

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

VIKTOR RICIJAŠ

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

KANDIDAT:

VIKTOR RICIJAŠ

MENTOR:

Izv. prof. dr. sc STJEPAN STRELEC

VARAŽDIN, 2017

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom
GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA
TRASE CESTE I TEHELJEVA PJEŠAKOG MOSTA U NP PAKLENICA
(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom Izv. prof. dr. sc. Stjepana Streleca.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 4.9.2014.

VIKTOR KUVAŠ

(Ime i Prezime)

03530981416

(OIB)

Viktor Kuvaš

(Vlastoručni potpis)

Sažetak

Autor: Viktor Ricijaš

Naslov rada: „Geotehnička istraživanja za potrebe polaganja trase ceste i temeljenja pješačkog mosta u NP Paklenica“

U ovom radu objašnjeni su i opisani geotehnički istražni radovi za potrebe polaganja trase ceste i temeljenja pješačkog mosta u NP Paklenica. Cilj istražnih radova je dobivanje pouzdanih informacija o fizičko-mehaničkim svojstvima tla na kojem se gradi. Geotehnički istražni radovi uključuju geoelektrično sondiranje i tomografiju, georadar, „in situ“ istraživanje Schmidtovim čekićem, istražno bušenje sa standardnim penetracijskim testom, te su izvršena granulometrijska ispitivanja u laboratoriju. Dobiveni rezultati istraživanja kasnije su korišteni u daljnjim izračunima, te su izračunate analize slijeganja, nosivosti i modul reakcije tla.

Ključne riječi: Geofizička istraživanja, terenski istražni radovi, GPR, ERT,

Sadržaj

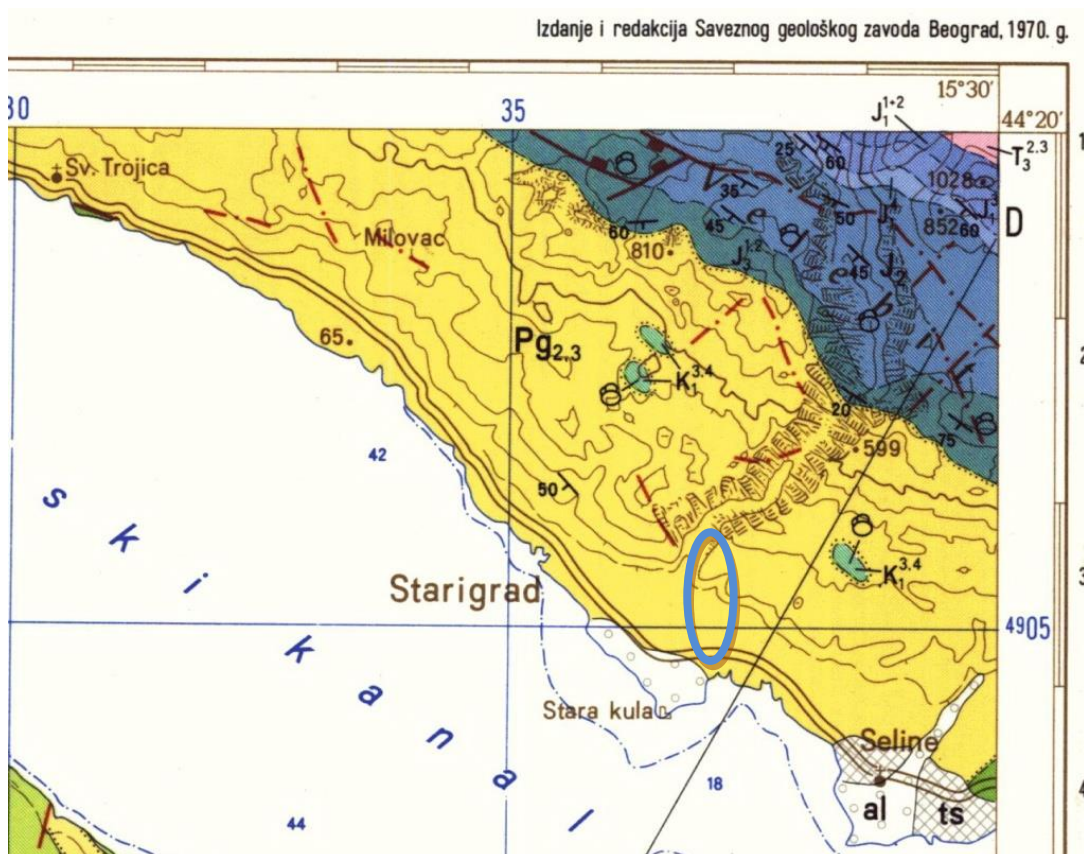
1.UVOD.....	1
2.GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI	2
3. GEOELEKTRIČNA ISTRAŽIVANJA	3
3.1 Geoelektrično sondiranje (VES)	5
3.2 Geoelektrična tomografija	7
4. GEORADAR	9
5. ISTRAŽNO BUŠENJE SA STANDARDNIM PENETRACIJSKIM TESTOM (SPT)...	11
6. GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA	13
7.FIZIČKO-MEHANIČKI PARAMETRI STIJENA	16
7.1 Schmidtov čekić	17
7.2 RocLab program	21
8. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE TEMELJNOG TLA	24
9. GEOSTATIČKE ANALIZE	28
9.1. Analiza nosivosti	28
9.2 Analiza slijeganja	30
9.3 Modul reakcije tla.....	30
10. ZAKLJUČAK.....	34
11. POPIS LITERATURE	36
Popis slika.....	37
Popis tablica	38
Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu	39
GRAFIČKI PRILOZI	40

1.UVOD

Tijekom zadnja dva desetljeća sve više se ističe važnost očuvanja i zaštite okoliša kod većine struka a pogotovo kod geotehnike. Kako se područje na koje su planirani geotehnički zahvati nalazi u Nacionalnom Parku Paklenica, zaštita okoliša dolazi do još većeg izražaja. Ovaj rad prati i objašnjava tijek i vrstu radova koji su opisani u elaboratu pod nazivom „Geotehnički elaborat za potrebe polaganja trase ceste u NP Paklenica“. Terenska geotehnička i geofizička istraživanja na lokaciji trase ceste u NP Paklenica provedena su za potrebe utvrđivanja uvjeta posteljice i temeljenja mosta preko doline Velike Paklenice. Terenska istraživanja uključuju istražno bušenje, te geofizička istraživanja metodama geoelektrične tomografije, te georadarskih snimanja. Na svim lokacijama snimljeni su osnovni elementi za inženjerskogeološku karakterizaciju mikrolokacija. Cilj provedenih istražnih radova bio je prikupljanje podataka o općim i mehaničkim svojstvima temeljnog tla, kako bi se odredili optimalni uvjeti temeljenja, nosivost, slijeganja i mehaničke stabilnosti. U geotehničkom elaboratu sadržani su rezultati istraživanja sastava temeljnog tla, ispitivanja tla “in situ”, proračun dopuštenog opterećenja tla i proračun slijeganja građevina (Colev, 2014). Za razliku od većine geotehničkih istražnih radova, geofizička istraživanja najmanje su invazivna (neznatno poremećuju okoliš u kojem se izvode) pa je to jedan od faktora zašto su upravo ona korištena u NP Paklenica.

2. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI

Prilikom geotehničkih terenskih istraživanja najprije se koriste geološke karte (Slika 1.) i postojeća dokumentacija zadanog područja, te nakon toga slijede geofizička terenska istraživanja jer nam daju mnoštvo osnovnih informacija te su mnogo jeftinija od istražnih bušotina i služe za utvrđivanje rasporeda, debljine i svojstava pojedinih slojeva ispod površine terena na kojem je predviđeno izgraditi građevinu. Pod pojmom geofizička istraživanja spadaju brojne metode kao što su: gravimetrijska, magnetometrijska, radiometrijska, geoelektrična, seizmička, geotermička, georadar i geofizička karotažna mjerenja. Geofizička istraživanja u ovom radu uključuju električnu tomografiju i sondiranje (ERT profil, $l=115$ m), te georadarsko profiliranje (GPR).



Slika 1. Položaj trase ceste na osnovnoj geološkoj karti.(Colev, 2014).

Ostale metode korištene na terenu su: ispitivanja fizičko-mehaničkih značajki stijenske mase u cilju su dobivanja parametara potrebnih za određivanje čvrstoće za smicanje (kohezija i kut unutrašnjeg trenja) pomoću Schmidtovog čekića, informatičkim programom RocLab dobivena je vrijednost za geološki indeks čvrstoće GSI, na lokaciji temelja stupa mosta izvedena je istražna bušotina s kontinuiranim jezgrovanjem te na određenim dubinskim intervalima napravljen je standardni penetracijski test (SPT). U laboratoriju je napravljen granulometrijski dijagram nekoherentnog tla.

3. GEOELEKTRIČNA ISTRAŽIVANJA

Električne metode temelje se na mjerenjima različitih električkih svojstava stijena i tla. Različite stijene pokazuju različita svojstva te se njihovim određivanjem i interpretacijom mogu dobiti saznanja o geološkoj građi i sastavu nekog terena. Električne metode mogu se podijeliti na metode koje opažaju već postojeća, prirodna električna polja (metoda prirodnog potencijala, telurska metoda, magnetotelurska metoda i dr.) i metode koje opažaju umjetna, izazvana električna polja (metode otpornosti, metoda inducirane polarizacije i dr.). U električnim istraživanjima koriste se tri osnovna eklektična svojstva stijena:

- otpornost ili inverzna provodljivost, koja daje količinu struje koja prolazi kroz stijenu kada se uspostavi specifična razlika potencijala,
- elektrokemijska svojstva stijena s obzirom na elektrolite u podzemlju, koja se koriste u metodi vlastitog potencijala i metodi inducirane polarizacije,
- dielektrična konstanta, koja daje informacije o kapacitetu stijena za pohranjivanje električnog naboja i utječe djelomice na reakciju stijenskih masa prema visokofrekvencijskim izmjeničnim strujama (Šumanovac, 2007).

Otpornost je osnovno svojstvo tla i geomedija i koristi se za određivanje vrste tla prema Ohmovom zakonu koji glasi :

$$R = \frac{U}{I}$$

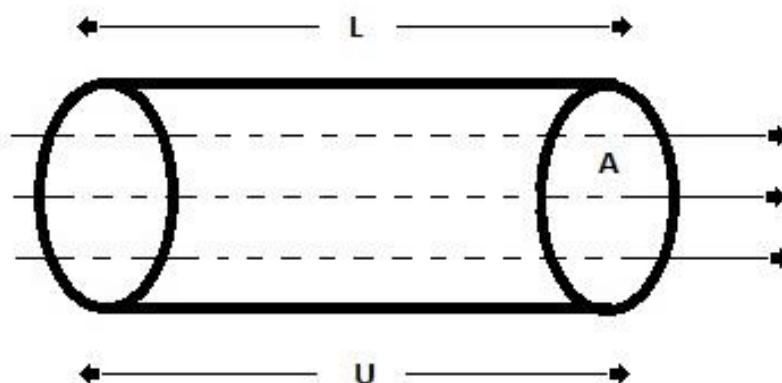
R označuje otpor

U je razlika potencijala između dviju ploha konstantnog potencijala

I označuje jakost električne struje u vodljivom tijelu

Električna otpornost nekog materijala definirana je kao otpor valjka s jediničnim presjekom i duljinom (Slika 2.). Ako kroz valjak teče struja s usporednim linijama toka preko površine presjeka A, tada je njegova otpornost ρ definirana jednačbom (Šumanovac, 2007):

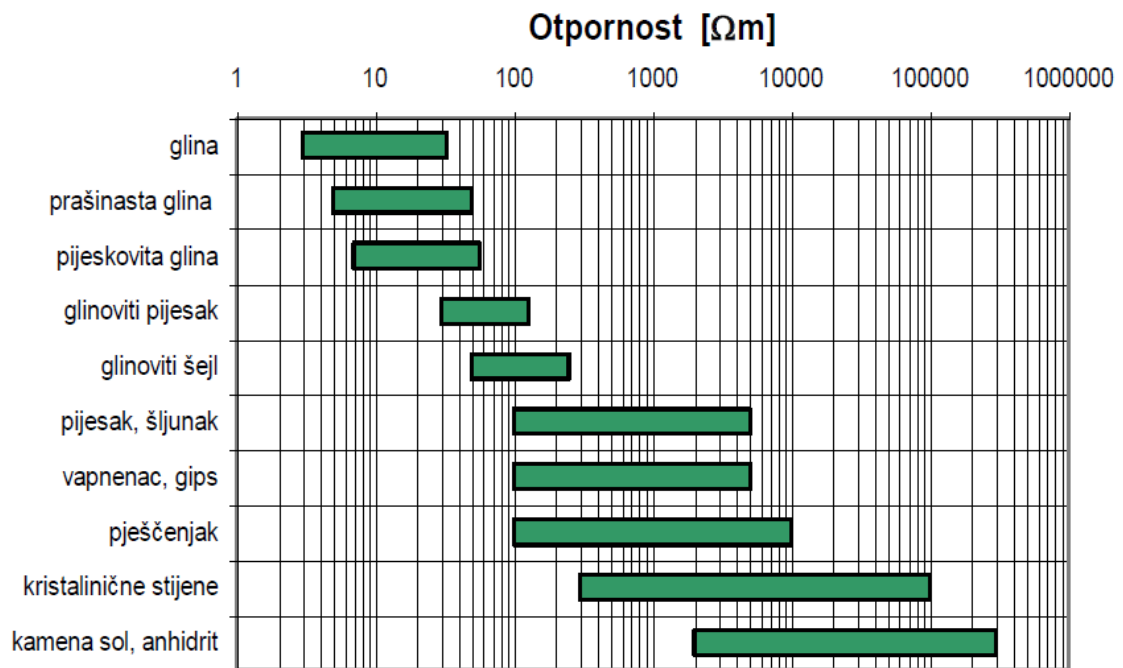
$$\rho = \frac{RA}{L}$$



Slika 2. Definicija otpornosti

Zbog različitog stupnja poroznosti stijene i saturiranosti vodom, otpor se može mijenjati u širokim granicama (Slika 3.), te svi mjerni iznosi prividnog otpora bit će jednaki stvarnom otporu samo ako je geološka sredina po cijeloj ispitanoj dubini homogena. Geološke sredine su najčešće heterogene pa prividni otpor, unutar zahvaćene dubine, ima neku prosječnu vrijednost, koja ovisi o otporima i raspodijeli materijala po dubini te o razmacima elektroda.

Pri interpretaciji rezultata mjerenja uvažene su postojeće spoznaje o sastavu i građi terena. Prikupljeni podaci pouzdani su ako se potvrde istražnim bušotinama, te ako rezultate mjerenja interpretira iskusan geoelektričar.

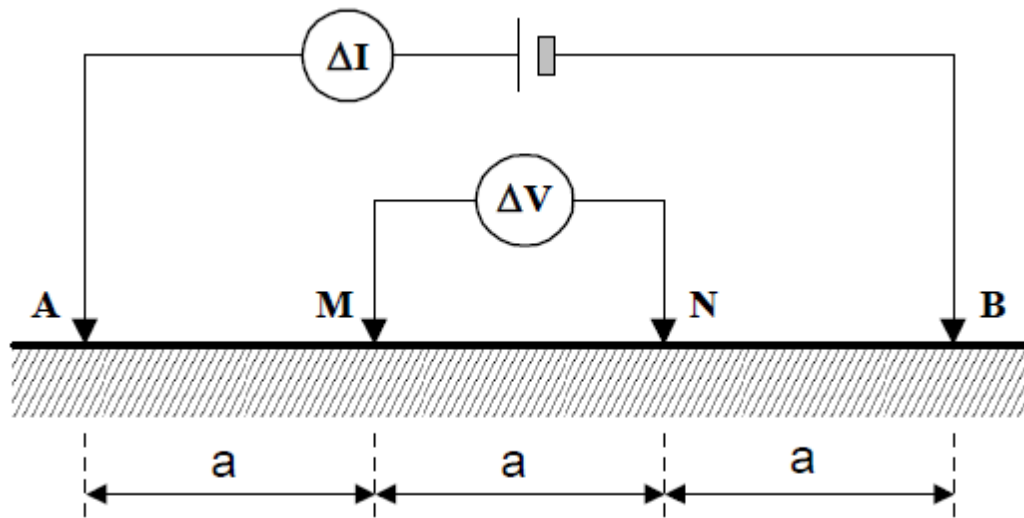


Slika 3. Prikaz granica otpornosti nekih materijala (Colev, 2014).

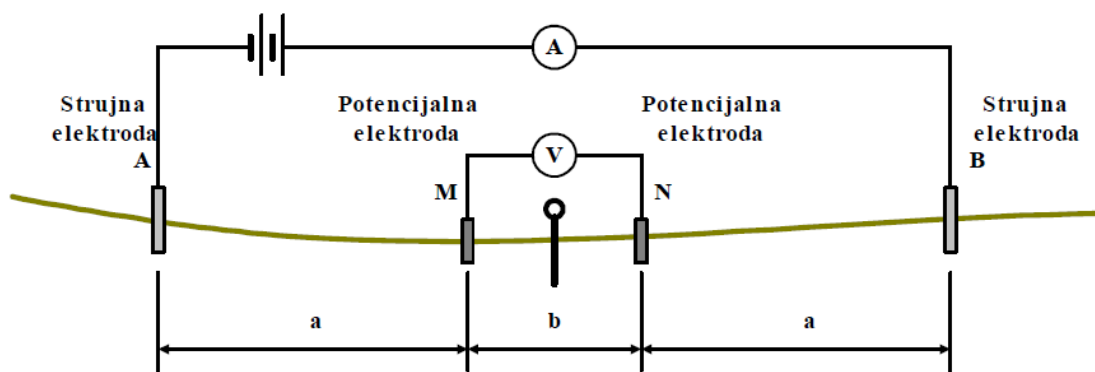
3.1 Geoelektrično sondiranje (VES)

Geoelektrično sondiranje je jedna od metoda električne otpornosti koja nam prikazuje svojevrsnu geoelektričnu strukturnu bušotinu, jer razmicanjem strujnih elektroda zahvaća se sve veća masa stijena i prodire se u sve veće dubine. Kod ovih mjerenja razmak elektroda različit je za svako mjerenje, dok centar elektrodnog polja, u kojem se mjere razlike potencijala, ostaje fiksiran te se prikazuju razlike potencijala u odnosu prema onom izmjerenom u centru elektrodnog polja. Dubina sondiranja ovisi o međusobnoj udaljenosti strujnih i naponskih elektroda, pa što je veći međusobni razmak elektroda, veća je dubina ispitivanja. Elektrode se obično postavljaju u ravnoj liniji, s time da se strujne elektrode (*A* i *B*) nalaze izvan naponskih elektroda (*M* i *N*). Mjeri se jakost struje između strujnih elektroda pa se iz razlike potencijala između potencijalnih elektroda, pomoću konstante geometrijskih odnosa svih elektroda, određuje prividna otpornost. Interpretacijom se određuju debljine i specifični električni otpor pojedinih geoelektričnih sredina. Za geoelektrično sondiranje najčešće se koriste dva načina rasporeda elektroda. Najjednostavniji način, u smislu geometrijskog rasporeda elektroda, je Wennerov raspored (*Slika 4.*), dok

je najbrži raspored, u smislu terenskog rada, Schlumbergerov način geoelektričnog sondiranja (Strelec i sur. 2012) (*Slika 5.*).



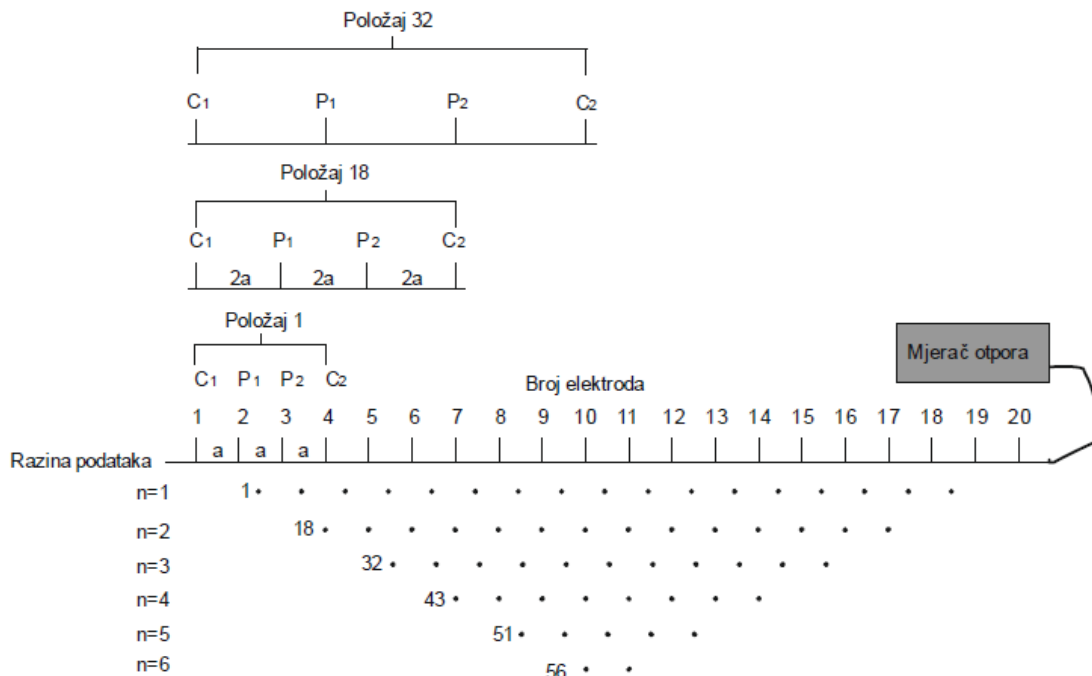
Slika 4. Wennerov raspored elektroda (Strelec i sur. 2012)



Slika 5. Schlumbergerov raspored elektroda (Strelec i sur. 2012)

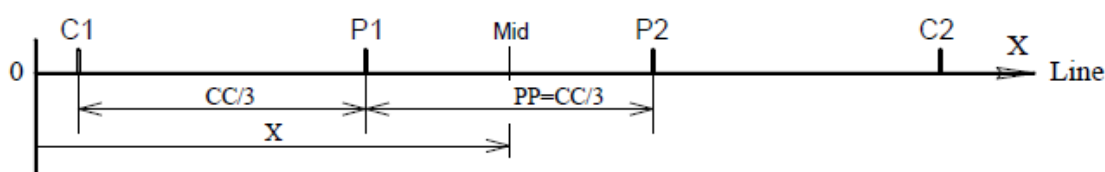
3.2 Geoelektrična tomografija

2D-električna tomografija je površinska geoelektrična metoda kojom se istražuju električne otpornosti stijena, te se najčešće ubraja u metode prividne otpornosti. 2D istraživanja daju bolji i precizniji model podzemlja nego 1D istraživanja jer uzimaju u obzir i vertikalne i horizontalne promjene otpornosti. 2D-električnom tomografijom se mogu vrlo uspješno istraživati izdužene geološke strukture, ali pri tome treba profil postaviti što više okomito na pružanje struktura. Nakon završetka procesa mjerenja razmakom $1a$, slijedi mjerenje s razmakom $2a$. Elektrode 1, 3, 5, 7 koriste se kod prvog mjerenja, a te elektrode su izabrane kako bi između njih razmak bio $2a$. Kod drugog mjerenja uzimaju se elektrode 2, 4, 6, i 8, te se ovaj postupak ponavlja sve dok se ne iskoriste elektrode 14, 16, 18 i 20, a ujedno je to i posljednje mjerenje s razmakom $2a$. Isti proces se ponavlja za razmake $3a$, $4a$, $5a$ i $6a$. Kako bi mjerenja bila što točnija i kako ne bi došlo do pogreške, treba sve raditi sistematično (Slika 6). Važno je napomenuti da kako se povećava razmak između elektroda, tako se smanjuje broj mjerenja tj. broj mjerenja uzduž profila ovisi o vrsti rasporeda elektroda (Strelec i sur. 2012).



Slika 6. Raspored elektroda kod geoelektrične 2D tomografije(Wenner)
(Strelec i sur. 2012)

U našem slučaju koristio se Wennerov raspored elektroda u kojem se mjeri jakost struje pomoću konstante geometrijskih odnosa elektroda (za Wenner PRF – $K=2\pi CC/3$), određuje prividna otpornost. U Wennerovom mjernom rasporedu za profiliranje koriste se dvije strujne elektrode (C1 i C2) i dvije potencijalne elektrode (P1 i P2) smještene u liniji i centrirane na nekoj lokaciji (Slika 7).



Slika 7. Wennerov raspored (Colev, 2014)

gdje je:

X : udaljenost u profilu do polovišta P1P2 (Mid)

$CC/3$: trećina udaljenosti strujnih elektroda ($CC/3$)

Polovište potencijalnih elektroda P1 i P2 nalazi se na udaljenosti X od početka geoelektričnog profila. Pri mjerenju udaljenost P1-P2 iznosi trećinu udaljenosti C1C2 ($PP=CC/3$) (Colev, 2014).

Interpretirani rezultati prikazuju se kao grafički prikaz profila otpornosti s dubinom (Prilog 1). Profil se može prikazati u boji ili u crno-bijelome prikazu, gdje različite šrafure prema legendi prikazuju zone različitih otpornosti. Trapezasti oblik grafičkog prikaza, gdje se s udaljenošću od središta profila smanjuje dubina interpretacije, razlog je u postepenom smanjivanju prikupljenih podataka kako se razmak strujnih i potencijalnih elektroda povećava. Ako su potrebni ovi podaci kompletan profil se može preseliti duž linije istraživanja, te se grafički prikazi nastavljaju jedan na drugi. Kategorije tla prema električnim otpornostima su prikazane u sljedećoj tablici.

Tablica 1. Kategorije tla prema električnim otpornostima, dolina Velike Paklenice.

ELEKTRIČNA OTPORNOST	KLASIFIKACIJA TLA
100 - 200 Ωm	<u>prašinski šljunci (zavodnjeni)</u>
200 - 600 Ωm	<u>prašinski šljunci (suhi)</u>
600 - 1200 Ωm	<u>vrlo jako okršena stijena V. kategorije i kameni nabačaj</u>
> 1200 Ωm	<u>srednje okršena stijena III kat i blokovi</u>

4. GEORADAR

Tijekom povijesti georadar se koristio za određivanje debljine leda, te su ubrzo otkrili da je dio valova prodirao i dublji nezaleđeni sloj tla, ali da maksimalna dubina može iznositi tek nekoliko desetaka metara. Danas georadar se koristi za veoma plitka istraživanja poput odlagališta otpada, građevinskih i arheoloških lokacija. Georadar je geofizička metoda koja koristi elektromagnetske valove u kratkim intervalima, te rasponom frekvencije otprilike 50% vrijednosti iznad i ispod zadane centralne frekvencije. Tipična frekvencija od 100 MHz sadrži značajnu količinu frekvencija od 50 MHz i 150 MHz. (Milsom, 2003) Elektromagnetski valovi se odbijaju od anomalija u tlu i vraćaju se u prijemnu antenu. Promjene u dielektričnim svojstvima reflektiraju relativne promjene u tlu. Elektromagnetska frekvencija i električna vodljivost tla određuju dubinu georadarskih ispitivanja. Širenje valova je ovisno o svojstvima geomedija, početnoj frekvenciji i jakosti valova. Najvažniji faktori koji opisuju širenje valova su brzina valova i prigušenje. Brzina i prigušenje valova ovise o dielektričnim svojstvima i otporu geomedija. Na dielektričnost i otpornost stijena utječu: poroznost, vodopropusnost, diskontinuiteti, temperatura, pojava mineralnih glina i dr. Kod zemljanih materijala se vodljivost mijenja u ovisnosti od strukture tla, porne vode, prisutnosti glinenih dijelova te slanosti porne vode.

Operativno djelovanje georadara je od 10 Hz do 1000 MHz. U tom području je brzina elektromagnetskih valova konstantna te ne dolazi do disperzije signala (Strelec i sur. 2012). Viša frekvencija daje bolju rezoluciju snimke ali smanjuje maksimalnu dubinu, dok niža frekvencija daje lošiju rezoluciju ali veću dubinu. Georadar se pokazao izrazito dobar u istraživanju naslaga suhih pjeskovitih tala, granita, vapnenačkih i sličnih stijena omogućivši puno veće dubine istraživanja nego kod glinovitih tala i saturiranih glina kod kojih su dubine dopiranja vala vrlo male (do nekoliko centimetara).



Slika 8. Georadarska oprema

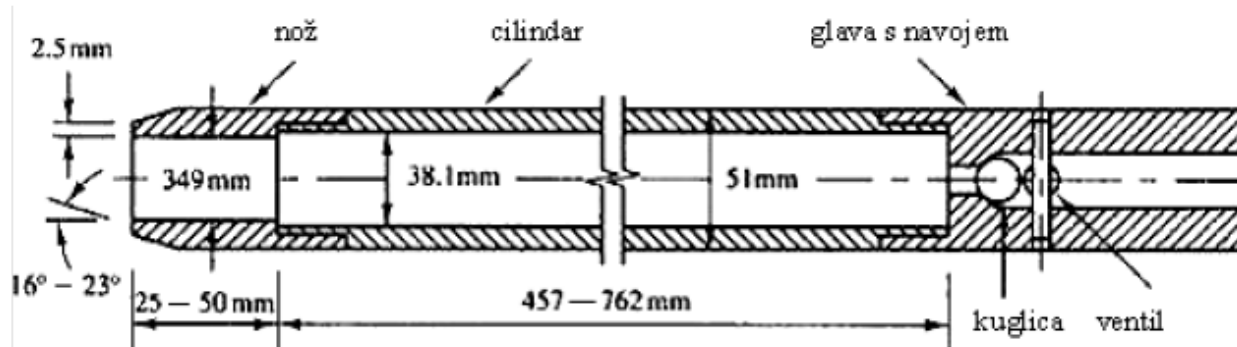
Prilikom istraživanja na lokaciji NP Paklenica georadar je korišten na području oko starog mlina (GPR-1), na trasi postojeće ceste (GPR-2-3), te na području istražne bušotine (B-1) (GPR-4) (Prilog 2).

U grafičkom prilogu (Prilog 3.) je prikazana šira situacija područja radi boljeg prikaza i razumijevanja položaja geofizičkih istraživanja koja su provedena. ERT krivulja na slici prikazuje profil električne tomografije, GPR krivulje prikazuju georadarske profile.

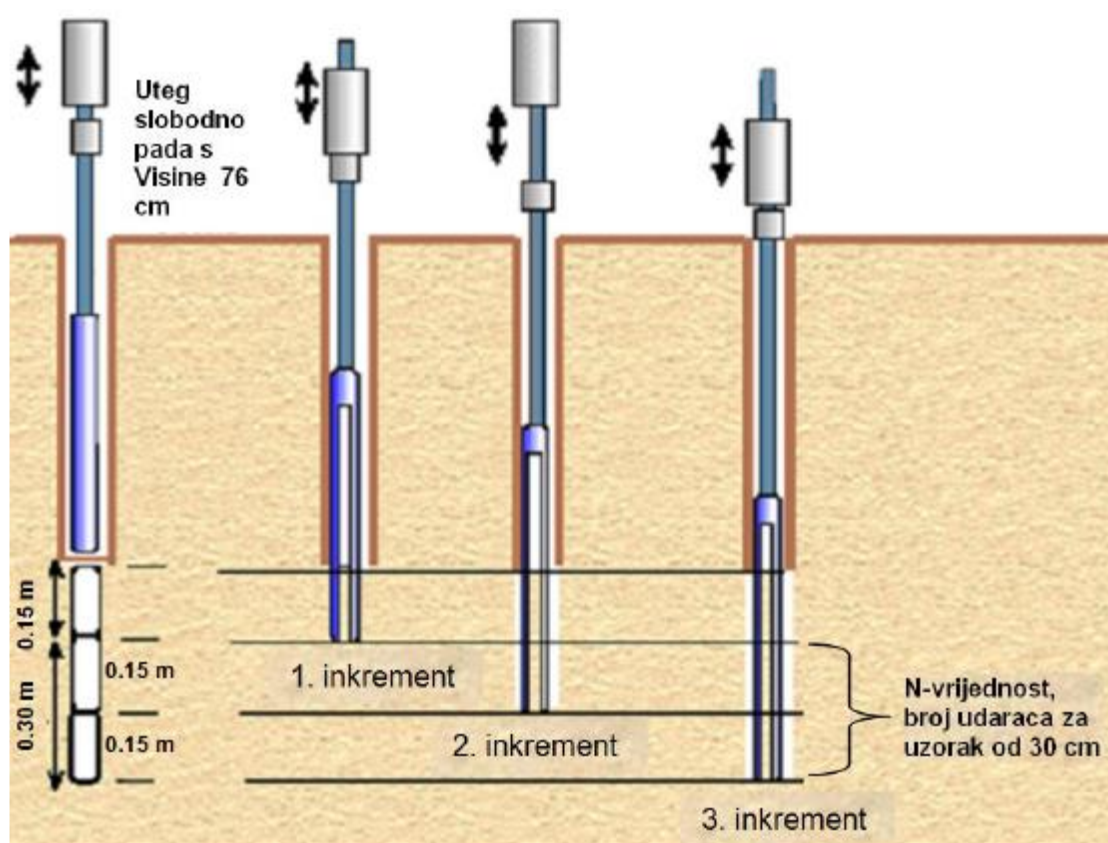
5. ISTRAŽNO BUŠENJE SA STANDARDNIM PENETRACIJSKIM TESTOM (SPT)

Prilikom geotehničkih istražnih radova poželjno je rezultate geofizičkih istraživanja potvrditi s rezultatima jedne ili više istražnih bušotina. Broj i lokacija istražnih bušotina ovisi o tipu i stupnju kompleksnosti objekta, a pošto je proces bušenja skup, poželjno je pronaći optimalan omjer između broja bušotina i količine podataka potrebnih za izvođenje geotehničke građevine. U našem slučaju izvodila se jedna istražna bušotina sa standardnim penetracijskim testom na području temelja mosta. Standardni penetracijski pokus se koristi za određivanje čvrstoće i deformacijskih svojstava koherentnih i nekoherentnih tala. Prvenstveno se određuje relativna gustoća tla, a preko empirijskih korelacija mogu se odrediti posmična čvrstoća, modul elastičnosti, slijeganja, nosivost temelja i druge veličine. Ovaj se pokus izvodi u bušotini izbušenoj rotacijskom metodom bušenja, spiralnim svrdlima ili metodom bušenja s isplakom. Oprema za provođenje pokusa sastoji se od bušačkih šipki, koje za dubine do 15 m imaju masu od oko 6 kg/m, a za veće dubine oko 8 kg/m; utega od 63,5 kg (622,3 N) na vodilici s mehanizmom za dizanje na visinu od 76,2 cm i spuštanje, da bi se postiglo prodiranje od 30,48 cm; dvodijelnog cilindra s nožem za uzimanje uzorka, vanjskog promjera 51 mm, unutrašnjeg 35 mm i dužine 68,6 cm (Slika 9.); ili punog konusnog šiljka pod kutem od 60°, promjera 51 mm. Cilindar se postavlja na dno bušotine, a preko šipke je spojen s površinom Standardno se primjenjuje izvođenje SPT-a na svakih 1,5 m dubine. Na očišćeno dno bušotine se spuštaju bušaće šipke s odabranim nastavkom (nož ili konus). Uteg se diže na visinu od 760 mm s koje se pušta da gravitacijski pada na šipke. Broj udaraca (N-penetracijski otpor) se broji za napredovanje od tri uzastopna prodiranja u inkrementima od 15 cm (Slika 10.). Zbog mogućih poremećaja dna bušotine, broj udaraca za prvih 15 cm prodiranja može biti nepouzdan. Za konačan broj udaraca koristi se zbroj udaraca u drugom i trećem inkrementu kod ukupnog prodiranja od 30 cm. U slučaju da broj udaraca prelazi 50 (vrlo velika zbijenost) na bilo kojem inkrementu od 150 mm, ispitivanje se zaustavlja. Ispitivanje se zaustavlja i ako nije zabilježeno napredovanje u 10 uzastopnih udaraca. U tim slučajevima bilježi se broj udaraca na 25 mm. U slučaju da je broj udaraca manji od jedan,

inženjer bilježi da li je prodiranje nastalo od težine utega ili od težine bušačkih šipki. Nakon probijanja, cilindar s nožem se izvlači na površinu, nož i cilindar se odvajaju od bušačkih šipki, dvodijelni cilindar se otvara, te se iz njega vadi reprezentativan poremećeni uzorak (Strelec i sur. 2012).



Slika 9. Cilindar za SPT standardnih dimenzija prema ASTM (American Society for Testing and Materials) (Strelec i sur. 2012)



Slika 10. Postupak ispitivanja standardnim penetracijskim pokusom (Strelec i sur. 2012)

Nakon proučavanja uzorka jezgre iz bušotine, potvrdili smo da se na dubini od 0-4.1 m nalaze prašinski šljunci(GM) s pokojim tankim slojem organske tvari,

na dubini od 4.1-4.5 m se nalazi sloj stijena, na dubini od 4.5-5.7 m se nalazi sloj prašinastog šljunka(GM), te na dubini od 5.7-7.0 m se nalaze zaglinjeni šljunci(CM). Profil bušotine je grafički priazan u prilogu 4.

6. GRANULOMETRIJSKI SASTAV TLA

Granulometrijski sastav nam govori o zastupljenosti pojedinih dimenzija zrna unutar reprezentativnog uzorka tla. Na temelju granulometrijskog sastava se mogu procijeniti neke fizikalne karakteristike tla kao što su stišljivost, vodopropusnost, nosivost, podložnost eroziji, kapilarnost i dr. Postupak za određivanje granulometrijskog sastava za krupnozrnata tla jest sijanje, dok za sitnozrnata tla jest aerometriranje. U slučaju da tlo sadrži i krupnu i sitnu frakciju onda se koristi kombinirana analiza (tablica 2).

Tablica 2. Karakterizacija tla prema veličini zrna.

OPIS				NOMINALNI PROMJER (mm)	TLO PREMA RAZREDBI
ZRNA	KRUPNA	KAMEN		> 60	KRUPNOZRNATO TLO
		ŠLJUNAK	KRUPAN	60 – 20	
			SREDNJI	20 – 6	
			SITAN	6 - 2	
	SITNA	PIJESAK	KRUPAN	2 - 0.6	SITNOZRNA TO TLO
			SREDNJI	0.6 – 0.2	
			SITAN	0.2 – 0.06	
		PRAH	KRUPAN	0.06 – 0.02	
			SREDNJI	0.02 – 0.006	
		GLINA	SITAN	0.006 – 0.002	
				< 0.002	

Pri sijanju se važe masa koja se zadržava na situ određenog promjera te se taj postupak ponavlja za svako sito i posudu za hvatanje u kojoj se skupi najsitniji materijal. Kontrola postupka mora dati da je suma masa svih ostataka na sitima i mase koja je prošla kroz najfinije sito jednaka početnoj masi suhog uzorka. Kod aerometriranja udjeli pojedinih frakcija se određuju indirektno primjenjujući Stokes-ov zakon.

$$D_t = \sqrt{\frac{18 \times \eta \times H}{(\rho_s - \rho_w) \times t}} = \sqrt{\frac{18 \times \eta}{\rho_s - \rho_w}} \times \sqrt{\frac{H}{t}} = \text{const} \times \sqrt{\frac{H}{t}}$$

Uzorak tla se dispergira u vodi tako da se dobije suspenzija neke početne gustoće. Čestice tla postupno sedimentiraju na dno posude. Čestice većeg promjera padaju brže, a manjeg sporije. Tijekom postupne sedimentacije čestica povremeno mjerimo gustoću suspenzije u specificiranim vremenskim intervalima (Kavur, 2015). Početni volumen uzorka tla je volumen menzure, a volumen vode jednak je volumenu pora i praktički volumenu uzorka. Prema tome, stupanj zasićenosti i porozitet su jednaki 1. Rezultate sijanja i aerometriranja prikazujemo granulometrijskim dijagramom u kojem se na osi ordinata nanosi postotak količine uzorka koji je prošao kroz sito(N), a na apscisi promjer zrna (D) u logaritamskom mjerilu. Karakterizacija granulometrijskog sastava tla definirana je s koeficijentom jednolikosti (C_u), i koeficijentom zakrivljenosti (C_c) koji se određuju iz karakterističnih vrijednosti promjera zrna očitanih iz granulometrijske krivulje pri 10, 30, i 60% prolaska mase .

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \text{ - koeficijent zakrivljenosti}$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \text{ - koeficijent jednoličnosti}$$

U tablici 3. su prikazani termini za klasifikaciju graduacije na temelju koeficijenata zakrivljenosti i jednoličnosti

Tablica 3. Termini za klasifikaciju graduacije tla.

termin	C_u	C_c
Dobro graduiran	$C_u > 15.0$	$1 < C_c < 3$
Srednje graduiran	0.6 do 15.0	$C_c < 1.0$
Jednoliko graduiran	$C_u < 6.0$	$C_c < 1.0$
Slabo graduiran	Obično visok	Bilo koji (obično $C_c < 0.5$)

Na temelju podataka iz tablica 2 i 3 napravljen je USCS sustav klasifikacije (tablica 4.) u kojemu su tla podijeljena u prema udjelu čestica. Ako je više od 50% čestica većih od 0.06 mm, tlo je krupnozrnato te ovisno o promjeru zrna klasificira se u: šljunak (G) i pijesak (S). je više od 50% čestica manjih od 0.06 mm, tlo je sitnozrnato te se klasificira u : prah (M), glinu (C), treset (Pt) ili organsko tlo (O).

U uzorku tla uzetog iz bušotine B-1 na dubini od 0.5 m do 0.7 m nalazi dobro graduirani šljunak s prahom (GW-GM), a na dubini od 2.5 m do 2.7 m se nalazi prašinski šljunak (GM) (Prilog 5.)

Tablica 4. USCS (Unified Soil Classification System) jedinstvena (objedinjena) klasifikacija tla

Kriterij za dodjeljivanje simbola i naziva pojedinim grupama tla na osnovi laboratorijskih ispitivanja				Klasifikacija tla		
				Simbol	Naziv grupe	
Krupnozrnata tla(>50% ostaje na siću br.200 - 0.075mm)	Šljunak(>50% materijala ostalo na siću br.4 - 4.75mm)	Čisti šljunak (manje od 5 %sitnih čestica)	$C_u \geq 4$ i $1 \leq C_c \leq 3$	GW	Dobro građuiran šljunak	
			$C_u < 4$ i/ili $1 > C_c > 3$	GP	Slabo građuiran šljunak	
		Šljunak sa stinim česticama(više od 12% sitnih čestica)	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH	GM	Prašinasti šljunak	
			Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	GC	Glinoviti šljunak	
	Pijesak(50% ili više materijala je prošlo kroz sito br.4 - 4.75mm)	Čisti pijesak(manje od 5% sitnih čestica)	$C_u \geq 6$ i $1 \leq C_c \leq 3$	SW	Dobro građuiran pijesak	
			$C_u < 6$ i/ili $1 > C_c > 3$	SP	Slabo građuiran pijesak	
		Pijesak sa stinim česticama((više od 12% sitnih čestica)	Sitne čestice se klasificiraju kao ML ili MH	SM	Prašinasti pijesak	
			Sitne čestice se klasificiraju kao CL ili CH	SC	Glinoviti pijesak	
	Sitnozrnata tla (<50% ili više prolazi kroz sito br.200 - 0.075mm)	Prahovi i gline(granica tečenja< 50%)	Anorganski	$I_p > 7$ i na ili iznad A-linije	CL	Posna glina
				$I_p < 4$ ili ispod A-linije	ML	Prah
Organski			(Granica tečenja– sušenje u peći)/(Granica tečenja – bez sušenja u peći) <0.75	OL	Organska glina	
					Organski prah	
Prahovi i gline(granica tečenja> 50%)		Anorganski	I_p na ili iznad A-linije	CH	Masna glina	
			I_p ispod A-linije	MH	Elastični prah	
		Organski	Granica tečenja– sušenje u peći)/(Granica tečenja – bez sušenja u peći) <0.75	OH	Organska glina	
					Organski prah	
Visoko organsko tlo		Primarno organska materija,tamne boje		PT	Treset	

7.FIZIČKO-MEHANIČKI PARAMETRI STIJENA

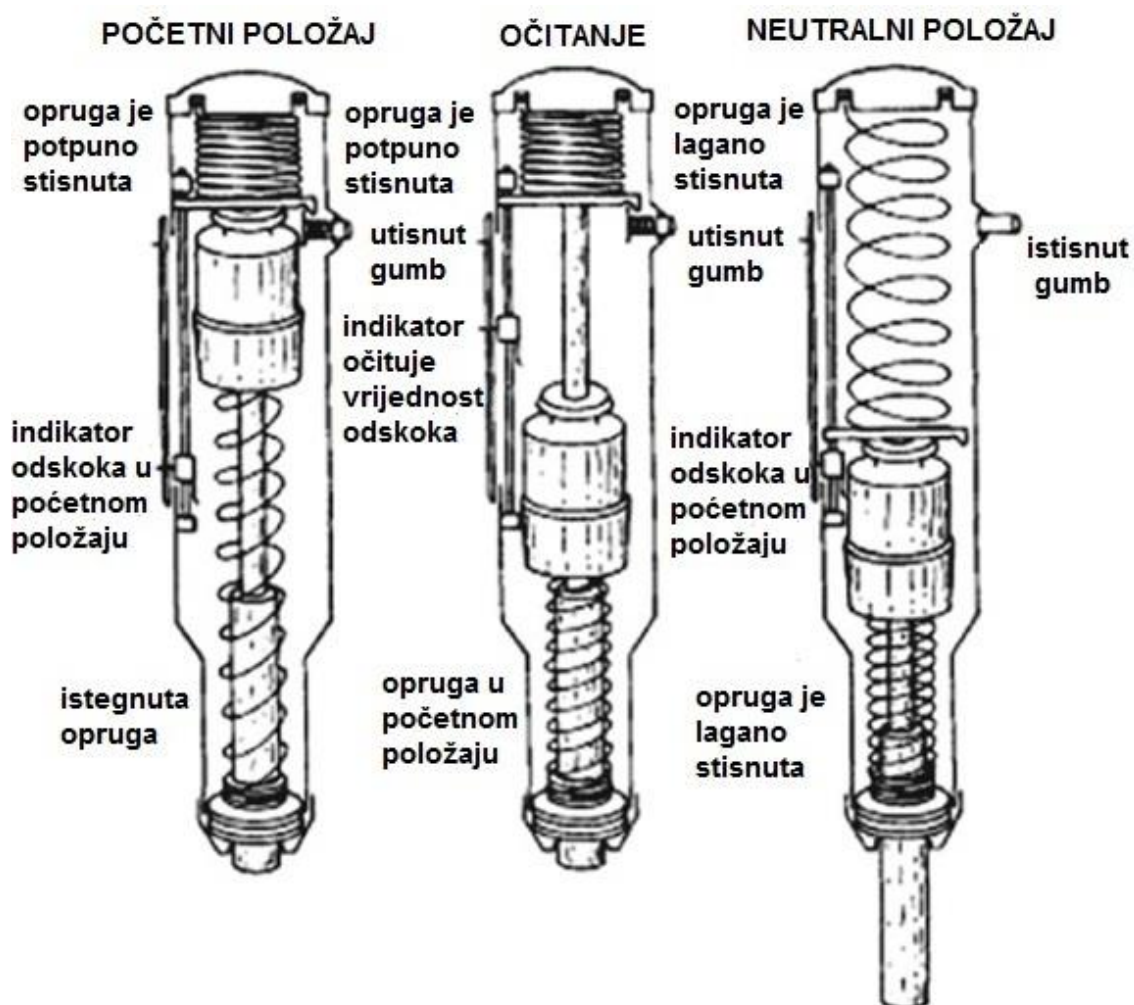
Da bi dobili parametre potrebne za određivanje čvrstoće na smicanje (kohezija i kut unutrašnjeg trenja) koji su nam potrebni za izračunavanje stabilnosti korištene su sljedeće metode:

- ispitivanje tlačne čvrstoće izdanaka stijene na površini Schmidtovim čekićem (sklerometar)

- određivanje geološkog indeksa čvrstoće (GSI) programom RocLab

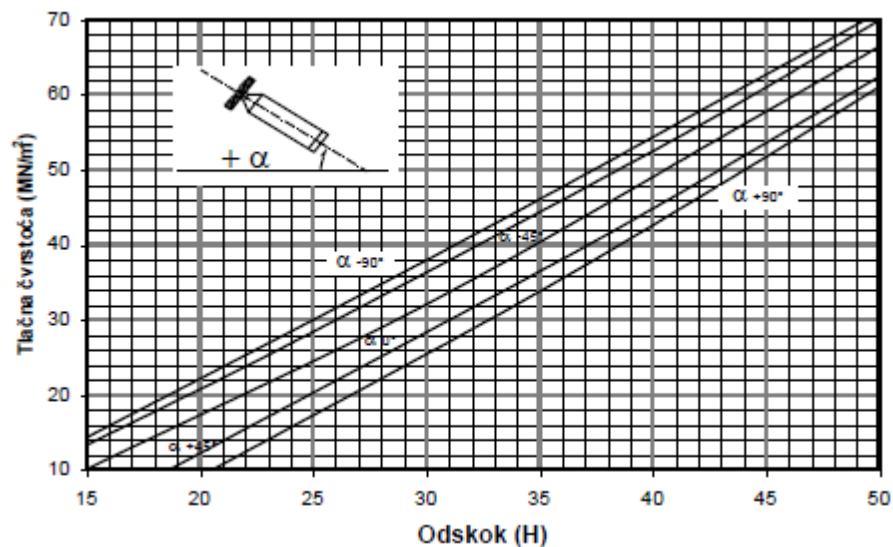
7.1 Schmidtov čekić

Schmidtov čekić zbog svoje praktičnosti (malih dimenzija i mase) vrlo često primjenjuje prilikom terenskih istraživanja. U primjeni postoje modeli Schmidtvog čekića s različitim energijama udara. Najčešće se koristi L-tip čekića s energijom udara od $0,735 \text{ Nm}$ i N-tip s energijom udara od $2,207 \text{ Nm}$. Schmidtov čekić sastoji se od utega koji uslijed oprugom akumulirane energije udara u čelični klip, a koji je u kontaktu s površinom ispitivanog materijala. Vrijednost odskoka utega nakon udara, u odnosu na njegov ishodišni položaj prije udara, predstavlja zapravo mjeru odskočne tvrdoće ispitivanog materijala (Strelec i sur. 2012).



Slika 11. Princip rada Schmidtvog čekića (Aydin, 2009).

N-tip čekića manje je osjetljiv na površinske neravnine te je pogodniji za korištenje na terenu, dok L-tip ima veću preciznost pri manjim vrijednostima i daje bolje rezultate prilikom testiranja slabijih, poroznih i trošnih stijena (Aydin, 2009). Prije ispitivanja Schmidtov čekić potrebno je kalibrirati na čeličnom nakovnju za kalibraciju, koji je izrađen od strane proizvođača Schmidtovog čekića. Korekcijski faktor se dobiva na temelju omjera specificirane vrijednosti odskoka i dobivene prosječne vrijednosti od 10 ispitivanja na čeličnom nakovnju za kalibraciju. Korelacije između jednoosne tlačne čvrstoće i Schmidtove tvrdoće najbolje se utvrđuju eksponencijalnim funkcijama jer se jednoosna tlačna čvrstoća eksponencijalno povećava s produktom gustoće materijala i odskočne tvrdoće. Međutim, izvedene jednadžbe od strane različitih autora jako ovise o tipu materijala i uvjetima ispitivanja. S obzirom na različite vrijednosti kuta pod kojim se ispitivanja mogu provoditi u odnosu na horizontalu, što je najčešće vezano uz uvjete ispitivanja na terenu i uzrok dobivanja različitih vrijednosti odskoka, razvijena je metoda za normalizaciju vrijednosti koja se može primijeniti kod svih tipova čekića i ispitivanja u svim smjerovima. Tim istraživanjima utvrđeno je i to da veličina zrna ima značajnu ulogu na raspršenje dobivenih vrijednosti, zbog čega N-tip čekića daje nešto bolje rezultate, upravo zbog primjene veće energije udarca čime se zapravo zahvati veći volumen materijala prilikom ispitivanja. Uzorci u obliku kocke trebali imati najmanju veličinu stranica od 110 mm , da bi se dobile jednake vrijednosti laboratorijskih i terenskih ispitivanja, promjer valjkastih uzoraka ne bi smio biti manji od promjera ($54,7\text{ mm}$) kod ispitivanja s L-tipom čekića, te po mogućnosti 84 mm kod ispitivanja s N-tipom čekića. Uzorci kvadratnog oblika ne bi smjeli imati debljinu manju od 100 mm na mjestu ispitivanja. Preporuka internacionalnog društva za mehaniku stijena (ISRM, 1978) je da se pokus izvodi u skupinama od po 10 ispitivanja po jediničnoj površini, s tim da se eliminira pet najmanjih rezultata, a računa se srednja vrijednost pet najvećih čitanja. Srednja vrijednost odskoka Schmidtova čekića (R) i zapreminska težina stijene koriste se za određivanje čvrstoće zidova diskontinuiteta (Strelec i sur. 2012).





Slika 12. Korelacijski dijagram tlačne čvrstoće prema odskoku Schmidtovog čekića (Colev, 2014).

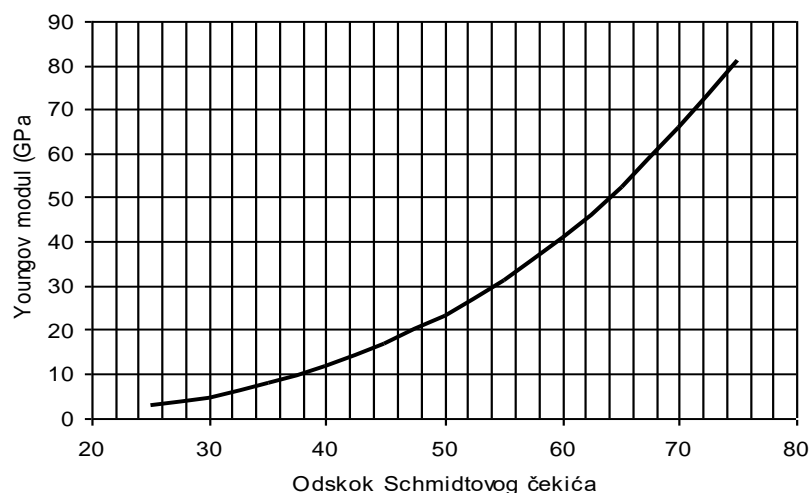
Mjerenjem na terenu u skladu s metodologijom preporučenom od strane internacionalnog društva za mehaniku stijena (ISMR, 1978), određeni su ulazni podaci za klasifikaciju stijenskih masa (Tablica 5.) prema odgovarajućim dijelovima "RMR"(Rock mass rating) i "Q" klasifikacije do razine određivanja Geološkog indeksa čvrstoće stijenske mase (GSI prema E. Hoek-u)

Tablica 5. Odskok Schmidtovog čekića za lokaciju trasa ceste NP Paklenica sa tlačnim čvrstoćama

uzorak broj	Lokacija	Otklon čekića [°]	Izmjerene vrijednosti odskoka [H]	Srednja vrijednost odskoka [H _{sr}]	Tlačna čvrstoća [MN/m²]	Youngov modul [GPa] intaktnog uzorka
1	izdanak matične stijene	-90	43 42 45 42 49 48 48 45	45,5	63,48	14,0
2	uzorak sa površine terena	-90	34 42 42 48 47 42 36 38	40,9	55,78	10,0
3	uzorak sa površine terena	-90	44 40 42 50 38 35 35 38	40,0	54,28	10,0
uzorak broj	Lokacija	Otklon čekića [°]	Izmjerene vrijednosti odskoka [H]	Srednja vrijednost odskoka [H _{sr}]	Tlačna čvrstoća [MN/m²]	Youngov modul [GPa] intaktnog uzorka

gromadasta vapnena breča donje krede									
4	uzorak sa površine terena	-90	42 31 32 28 40 35 47 45 31 45	37,6	50,32	9,0			
5	uzorak sa površine terena	-90	47 42 35 36 31 40 40 40 42 40	39,3	53,12	10,0			
6	uzorak sa površine terena	-90	44 45 44 52 48 48 42 44 46 46	45,9	64,15	16,0			
7	uzorak sa površine terena	-90	42 48 45 38 40 42 40 26 25 25	37,1	49,49	10,0			
uzorak srednje vezane mehaničke deluvijalne breče (lokalitet blažih strmina)									
9	uzorak sa površine terena	-90	24 32 29 14 22 16 20 20 20 21	21,8	24,86	0,5			







Na slici 13. je pouzdana korelacija prema O. Katzu (2000) za vrijednost Youngovog modula u odnosu na odskok Schmidtovog čekića. Vrijednosti odskoka i proračunate vrijednosti tlačne čvrstoće intaktnih uzoraka prikazane su u tablici 5.



Slika 13. Korelacijski dijagram Youngovog modula prema vrijednostima odskoka Schmidtovog čekića (Colev, 2014).

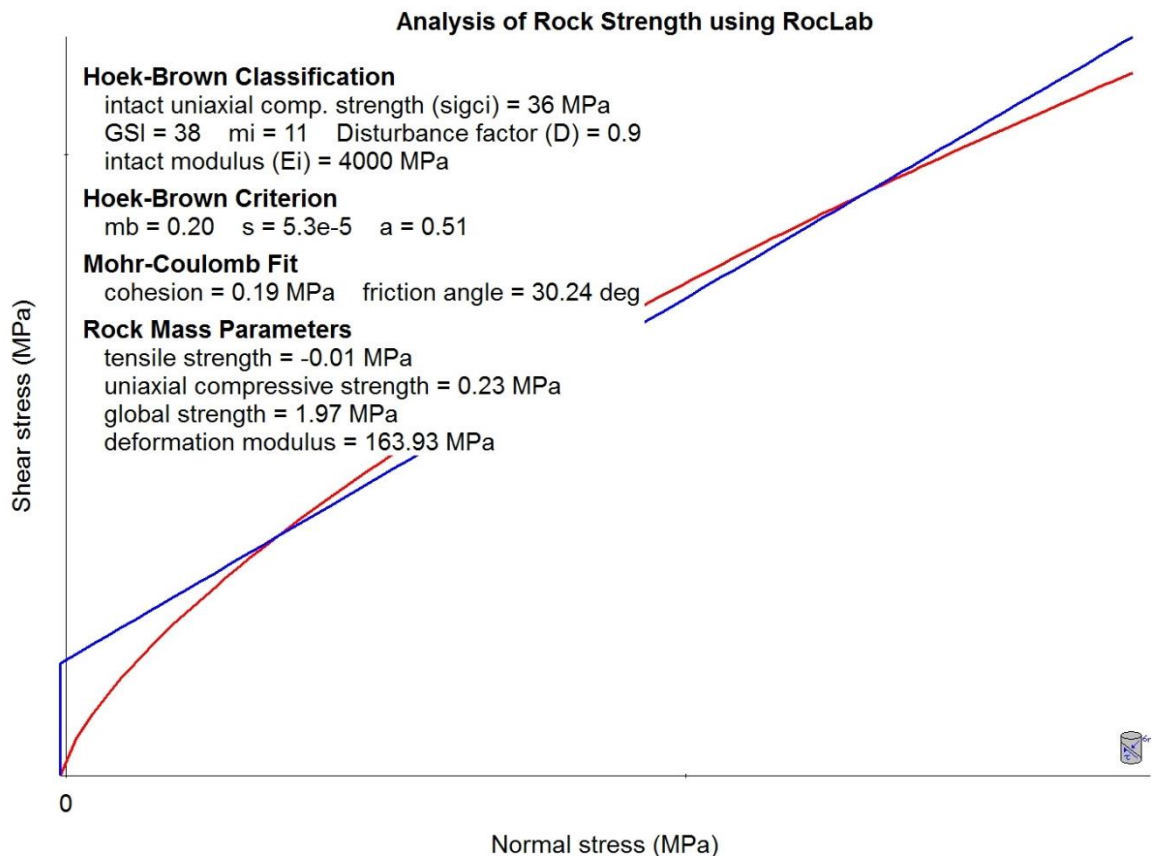
7.2 RocLab program

RocLab je računalni program pomoću kojeg određujemo čvrstoću stijene, na temelju Hoek-Brownovog kriterija čvrstoće. Korištenjem programa RocLab dobivena je vrijednost za geološki indeks čvrstoće $GSI = 38$ (Slika 14.), za karbonatnu stijenu III. do V. kategorije, tablica 2. Programom RocLab također su određeni ulazni parametri prema Hoek-Brownovoj klasifikaciji na osnovu kojih je dobiven dijagram nelinearnog odnosa normalnog i posmičnog naprezanja prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće. Hoek-Brownov kriterij sloma stijenske mase široko je korišten i prihvaćen u projektima koji su vezani za mehaniku stijena diljem svijeta.

GEOLOŠKI INDEKS ČVRSTOĆE GSI =		POVRŠINSKI UVJETI				
		VRLO DOBRI	DOBRI	SLABI	LOŠI	VRLO LOŠI
STRUKTURA		SMANJENJE KAKVOĆE POVRŠINE →				
	INTAKTNA ILI MASIVNA - primjerci čitave stijene ili masiva "in situ" s nekoliko diskontinuiteta na širem razmaku	90	80	70	N/D	N/D
	BLOKOVITA - dobro vezana, neporemećena stijenska masa sastavljena od kubičnih blokova formiranih s tri ukrižena diskontinuiteta	80	70	60	50	40
	VRLO BLOKOVITA - povezana, djelomično poremećena stijenska masa s višestrukim izbrušenim površinama blokova formiranih s četiri ili više sustava pukotina	70	60	50	40	30
	BLOKOVITA DO SREDNJE POREMEĆENA - rasjedani ili raspucani skup blokova nastao presjecanjem više diskontinuiteta pod različitim kutevima, uočljivo postojanje slojeva ili škriljavosti	60	50	40	30	20
	DEZINTEGRIRANA - loše povezana gotovo rastresita stijenska masa sastavljena od mješavine uglatih i zaobljenih blokova	50	40	30	20	10
	USLOJENA - nepostojanje blokova zbog malih razmaka između škriljavih ravna diskontinuiteta	N/D	N/D			
		SMANJENJE VEZANOSTI DIJELOVA STIJENE ↓				
		GSI = 38				

Slika 14. Određivanje geološkog indeksa čvrstoće (GSI) programom RocLab(Colev, 2014).

Na slici 15. dat je prikaz nelinearnog odnosa prema Hoek-Brownovom kriteriju čvrstoće. Polaganjem pravca teorijom najmanjih kvadrata na dobivenu krivulju dobivene su Mohr-Coulombove veličine, odnosno parametri čvrstoće stijenske mase. Prema dobivenim rezultatima prosječni prividni kut trenja stijenske mase iznosi $\phi = 31 - 33^\circ$, a prosječna prividna kohezija $c = 190 - 200 \text{ kN/m}^2$. Dobivene Mohr-Colombove veličine čvrstoće stijenske mase prikazane su također na slici 15.



Slika 15. Analiza čvrstoće stijenskog masiva korištenjem programa RocLab (Colev, 2014).

Ulazni parametri za modeliranje usvojeni su iz terenskih radova. Kriterij sloma stijenske mase definiran je generaliziranim Hoek-Brown-ovim kriterijem čvrstoće:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a$$

gdje su:

- σ_c – jednoosna tlačna čvrstoća homogenog uzorka stijene
- σ'_1 i σ'_3 – veće i manje efektivno glavno naprezanje
- m_b , a , s – iskustveni parametri stijenske mase definirani izrazima:
- $m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D} \right)}$

$$- \quad s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)}$$

$$- \quad a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-\frac{GSI}{15}} - e^{-\frac{20}{3}} \right)$$

gdje je:

- D – faktor poremećenosti stijenske mase
- m_i – parametar ovisan o vrsti stijene

GSI – geološki indeks čvrstoće

Usvojene su vrijednosti parametra:

- $\sigma_c = 48 - 50 \text{ MN/m}^2$ (sklerometar, Schmidt-ov čekić)
- **GSI = 38**
- **$m_i = 11-12$**
- **D = 0,9**

Analizom dobivenih podataka terenskih ispitivanja za izradu geostatičkog proračuna usvojeni su sljedeći parametri temeljne stijene koji su znatno reducirani:

$\gamma = 24 \text{ kN/m}^3$, - zapreminska težina,

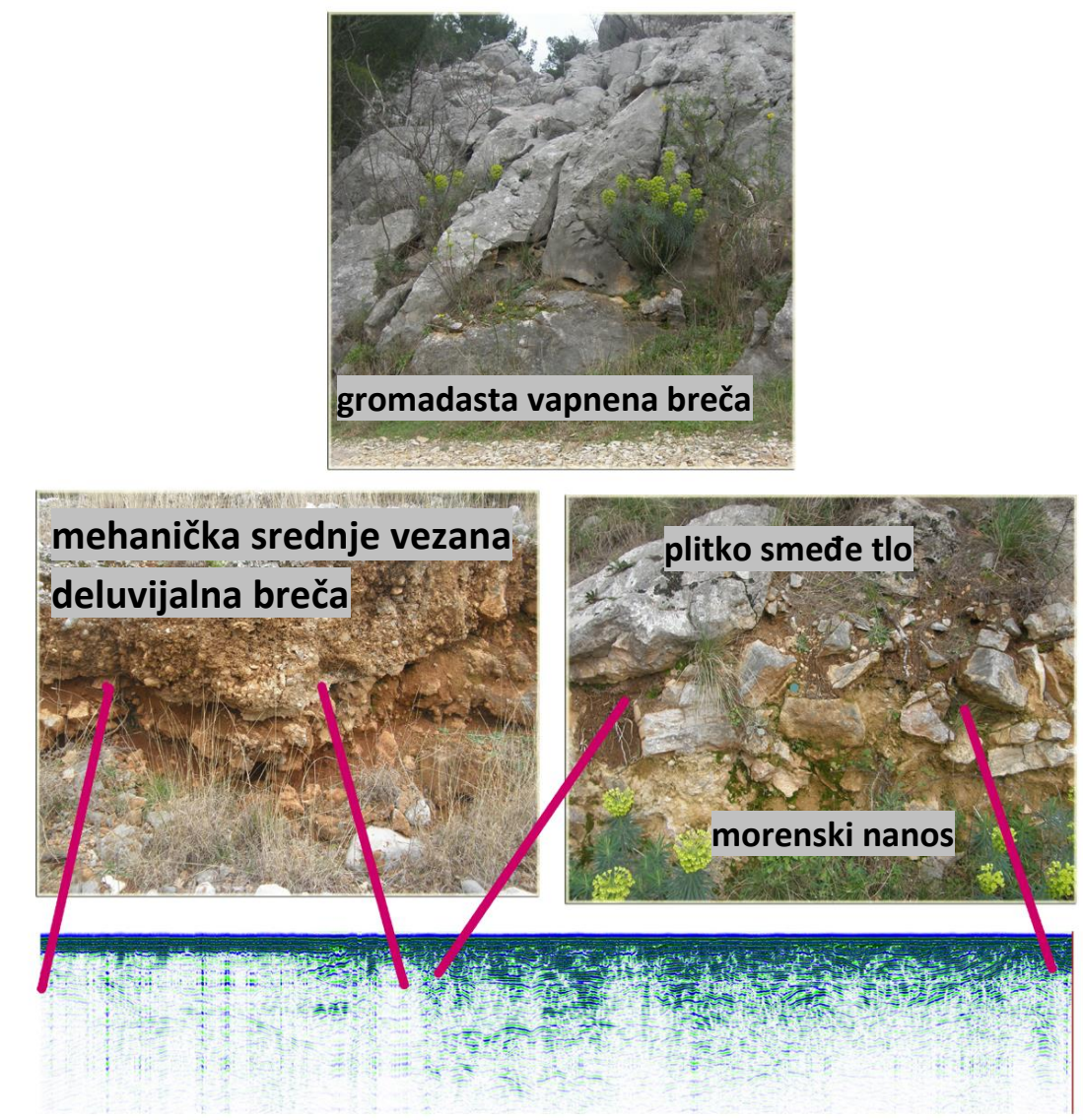
$c = 50 - 80 \text{ kN/m}^2$ - kohezija, (ovisno o modelu tla)

$\phi = 31^\circ - 35^\circ$ - kut unutrašnjeg trenja. (ovisno o modelu tla)

8. GEOTEHNIČKE ZNAČAJKE TEMELJNOG TLA

Predmetni prostor trase okarakteriziran je istražnim radovima i svrstan u tri osnovna geotehnička modela tla za potrebe polaganja ceste:

Na slici 16. vidljiva je usporedba karakteristika stijenske mase i interpretacija geofizičkih rezultata istraživanja.



Slika16. Slikovni prikaz modela tla (Colev, 2014).

MODEL TLA 1 - 0+000,00 do 1,060,00 m

Gromadasta vapnena breča predstavlja jako okršenu stijenu. Razmak diskontinuiteta iznosi 0,20 m, dok je maksimalno zabilježen 0,50 m. Trošenje osnovne stijene dominantno se odvija po predisponiranim diskontinuitetima. Morfološki izgled lokacije ovisi o kutu zalijeganja diskontinuiteta.

Jednoosna tlačna čvrstoća intaktnih uzoraka prikupljenih s površine terena ispitana je sklerometrom, a rezultat je u rasponu: $\sigma_c = 48 - 60 \text{ MPa}$.

Električne otpornosti: $> 1500 \Omega\text{m}$

Mohr-Coulomb-ovi parametri čvrstoće:

$\gamma = 22,0 \text{ kN/m}^3$, $M_v = 90 - 130 \text{ MN/m}^2$, $c = 80 \text{ kN/m}^2$ i $\phi = 33 - 35^\circ$

Tablica 6. Model temeljnog tla 1

KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA: MODEL TEMELJNOG TLA 1			
okršena stijena, III - IV kat.		jednoaksijalna čvrstoća intaktnog uzorka	geološki indeks čvrstoće
		$\sigma_c = 50 \text{ MPa}$	GSI = 38
Kategorizacija tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2008 en)			kat. tla A

MODEL TLA 2 - 1+060,00 do 1,145,00 m

Na zaravnima i konkavnim dijelovima obronaka debljina transportiranog trošnog tla je značajnija. Na ovom prostoru taložne su srednje vezane mehaničke deluvijalno-fluvijalne breče.

Na ovim lokacijama neophodna je priprema temeljnog tla čišćenjem i prema potrebi produbljivanjem temeljnog tla. Prilikom pripreme temeljne plohe uklanjaju se ostaci razlomljenog i okršenog materijala do čvrste podloge, uz obavezno čišćenje glinovite ispune pukotina kao i moguća "gnijezda" crvenice, a nastali prostor zapuniti podbetonom (C 16/20). Visinska razlika nastala zbog sanacije temeljnog tla ispunit će se betonom u koji je radi racionalnijeg utroška betona moguće dodati lomljeni kamen do udjela 50%.

Jednoosna tlačna čvrstoća intaktnih uzoraka prikupljenih s površine terena ispitana je sklerometrom, a rezultat je u rasponu: $\sigma_c = 24 \text{ MPa}$.

Električne otpornosti: 300 do 1200 Ωm

Mohr-Coulomb-ovi parametri čvrstoće:

$$\gamma = 22,0 \text{ kN/m}^3, \quad M_v = 80 - 150 \text{ MN/m}^2, \quad c = 50 \text{ kN/m}^2 \text{ i } \phi = 31^\circ$$

MODEL TLA 3 - 1+145,00 do 1,202,17 m

Dolinu Velike Paklenice grade aluvijalno-deluvijalni prašinski šljunci (GM), gusto pakiranog zrna, u pojedinim intervalima dubine sa sekundarnim kemijskim vezivom (vapneno vezanje).

Električne otpornosti: 200 do 500 Ωm

Udarci SPT probe: N = 8 do 40 udaraca/stopi.

Mohr-Coulomb-ovi parametri čvrstoće:

$$\gamma = 19,0 \text{ kN/m}^3, \quad M_v = 20 - 50 \text{ MN/m}^2, \quad c = 0 \text{ kN/m}^2 \text{ i } \phi = 36^\circ$$

Tablica 7. Model temeljnog tla 3

KARAKTERISTIKE TEMELJNOG TLA: MODEL TEMELJNOG TLA 3				
prašinasti šljunci (GM)		relativne zbijenosti D _r	oblik zrna	
		D _r = 60 - 90%	subzaobljenih oblika, d ₆₀ = 3 - 8 mm	
Prethodni račun nosivosti (idejna razina)				
TEMELJ STUPA DUBINA = 2,0 m	računska nosivost (EC7, DA3)	prosječno slijeganje	maks. diferencijalno slijeganje	faktor iskorištenosti (predimenzioniranja)
B x L = 2,0 x 5,0 m	q _{Rd} = 680 kN/m ²	s = 2,0 - 3,0 cm	S _{dif} = 1,5 cm	Γ = 1,24
Kategorizacija tla prema seizmičnosti (Eurocode 8, HRN EN 1998-1:2008 en)				kat. tla B

9. GEOSTATIČKE ANALIZE

9.1. Analiza nosivosti

Nosivost tla sukladno Aneksu D, Eurokoda 7 (EC7, HRN EN 1997-1:2008 en) izvodi se iz teorije plastičnosti i eksperimentalnih rezultata. Mehanička čvrstoća tla predstavljena je u dreniranim uvjetima sa c' i φ' .

Proračun nosivosti plitkog temelja za drenirane uvjete provodi se prema izrazu:

$$q_u = R/A' = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + 0,5 \gamma' B' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma$$

$A' = B' L'$ - korisna površina temelja, tj. dio ukupne površine osnovice temelja koji je rezultantnom silom centrički opterećen,

R - dopušteni otpor tla

γ - težina tla ispod razine temeljnog dna,

γ' - računska zapreminska težina tla,

q - najmanje efektivno opterećenje u razini temeljnog dna pokraj temelja,

ϕ' - računski kut posmične čvrstoće tla,

c' - računska kohezija tla,

N_γ i N_c - faktori nosivosti,

b_c, b_q, b_γ - faktori nagiba temeljne plohe,

s_c, s_q, s_γ - faktor oblika temelja,

i_c, i_q, i_γ - faktori nagiba rezultante.

Dopuštene su slijedeće grupe parcijalnih faktora: Projektni pristup 1, kombinacija 1 - DA1,1, koeficijenti ($A1+M1+R1$); DA1,2 ($A2+M2+R1$); DA2 ($A1+M1+R2$); DA3 ($A1$ ili $A2+M2+R3$).

Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7 dani su tablici 8:

Tablica 8. Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7 (EC7, HRN EN 1997-1:2008 en)

Parametar		Simbol	EQU	GEO/STR – Grupe parcijalnih faktora						
				A1	A2	M1	M2	R1	R2	R3
Stalno djelovanje (G)	Nepovoljno	γ_G	1,1	1,35	1,0					
	Povoljno	γ_G	0,9	1,0	1,0					
Pokretno djelovanje (Q)	Nepovoljno	γ_Q	1,5	1,5	1,3					
	Povoljno	-	-							
Akcidentno djelovanje (A)	Nepovoljno	γ_A	1,0	1,0	1,0					
	Povoljno	-	-	-	-					
Koeficijent posmičnog otpora($\tan\phi'$)		$\gamma_{\phi'}$	1,25			1,0	1,25			
Efektivna kohezija (c')		$\gamma_{c'}$	1,25			1,0	1,25			
Nedrenirana posmična čvrstoća(c_u)		γ_{c_u}	1,4			1,0	1,4			
Jednoosna tlačna čvrstoća(q_u)		γ_{q_u}	1,4			1,0	1,4			
Zapreminska težina(γ)		γ_γ	1,0			1,0	1,0			
Otpor nosivosti(R_v)		γ_{R_v}						1,0	1,4	1,0
Posmični otpor(R_h)		γ_{R_h}						1,0	1,1	1,0
Otpor tla(R_h)		γ_{R_e}						1,0	1,4	1,0

9.2 Analiza slijeganja

Uzrok slijeganju je dodatno kontaktno naprezanje na površini poluprostora uslijed opterećenja građevinom. Proračun se zasniva na idealiziranom modelu tla kao elastičnom, homogenom i izotropnom poluprostoru. Račun slijeganja za koherentno tlo izvodi se u skladu s Hookovim zakonom, a za nekoherentno tlo na osnovu otpora prodiranja šiljka pri izvođenju statičkog ili dinamičkog penetracijskog pokusa, te rezultata brzina širenja posmičnih valova.

9.3 Modul reakcije tla

Kao referentan pokazatelj deformacijskog ponašanja tla može se smatrati modul reakcije tla k_s . Modul reakcije tla je funkcija oblika i veličine kontaktne plohe, rasporeda i intenziteta opterećenja te sastava i svojstva tla. Kod proračunskog modela kod kojeg je tlo zamijenjeno sustavom opruga

(Winklerov prostor), k_s je koeficijent proporcionalnosti između dodatnog kontaktnog naprezanja Q ($Q=P-q$) i pomaka w točke na površini Winklerovog prostora:

$$k_s = \frac{Q}{w} \text{ (MN/m}^3\text{)}$$

Vrijednosti Q i w uzete su iz proračuna slijeganja karakteristične točke "K".

Tablica 9. Podatci o tlu i temeljnoj ploči

Podaci o tlu		
Kut unutrašnjeg trenja	$\varphi=$	36,0
Unutrašnja kohezija	$C=$	0,0
Obujamska težina tla iznad temelja	$\gamma=$	19,0
Obujamska težina tla ispod temelja	$\gamma'=$	9,0
Razina podzemne vode u proračunu	$RPV=$	0,5
Podaci o temelju		
Oblik temelja		Temeljna ploča/stopa
Dubina temelja	$D=$	2,00 m
Dubina širokog iskopa	$D_i=$	0,00 m
Visina temelja	$t=$	1,50 m
Širina temelja	$B=$	2,0 m
Dužina temelja	$L=$	5,0 m
Obujamska težina betona	$\gamma_{\text{BETON}}=$	24,0 kN/m ³
Kut nagiba baze temelja	$\alpha=$	0°
Otpor tla		
$q_u = R_k/A' = c'N_{c\gamma}b_{c\gamma}i_{c\gamma} + q'N_{q\gamma}b_{q\gamma}i_{q\gamma} + 0.5\gamma'B'N_{\gamma\gamma}b_{\gamma\gamma}i_{\gamma\gamma}$ (kN/m ²)		
Težina tla iznad temelja	$W_{\text{TLO}}=$	95,0 kN
Ukupna vlastita težina	$W=$	455,0 kN

temelja						
Geološko naprezanjenja temeljnoj dubini		q=	23,0 kPa			
Projektna djelovanja						
Vertikalna sila - GLAVNO	P_k =	2500,0 kN	$P_d=P_k*\gamma_G=$	3375,0 kN	$e_B=$	0 m
Vertikalna sila - POKRETNO	Q_k =	400,0 kN	$W_d=W*\gamma_Q=$	600,0 kN	$e_L=$	0 m
Vlastita težina		$W_d=W*\gamma_G=$	614,3 kN			
Ukupna vertikalna djelovanja		$V_d=P_d+Q_d+W_d=$	4589,3 kN			
Horizontalna sila - GLAVNO	$H_k=$	0,0 kN	$H_d=H*\gamma_G=$	0,0 kN	U smjeru L	0°
$B'=2,00\text{m}$		$L'=5,00\text{ m}$	$A'=10,0\text{ m}^2$			
Kontrola ekscentriciteta		$e_{dB}\leq B/6$ - u redu	$e_{dL}\leq L/6$ - u redu			
Projektni pristup, kombinacija DA(A1+M2+R3)						
Koeficijent posmičnog otpora	$\gamma_\phi=$	1,25	Stalna djelovanja $\gamma_G=$	1,35		
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}=$	1,25	Pokretna djelovanja $\gamma_Q=$	1,50		
Koeficijent otpora tla	$\gamma_{Rv}=$	1,00				
Zapreminska težina	$\gamma_\gamma=$	1,00				
Računski parametri tla	Efektivna kohezija		$c'=$	0,0 kPa		
	Efektivni kut posmične čvrstoće		$\phi'=$	30,2°		
Faktori nosivosti	Faktori oblika		Faktori nagiba baze temelja		Inklinacija V sile zbog H	
$N_c=$	30,54	$s_c=$	1,21	$b_c=$	1,00	$i_c=$ 1,00
$N_q=$	18,75	$s_q=$	1,20	$b_q=$	1,00	$i_q=$ 1,00

$N_\gamma=$	20,64	$s_\gamma=$	0,88	$b_\gamma=$	1,00	$i_\gamma=$	1,00
Dozvoljeno opterećenje tla		$q_u=$			681,45 kPa		
Dozvoljena nosivost proračunatog temelja		$R_k=$			6814,51 kN		
Dozvoljeni otpor tla proračunatog temelja		$R_d=R_k/\gamma_{Rv}=$			6814,51 kN		
Faktor predimenzioniranja		$\Gamma=$			1,48		
UVJET $V_d < R_d$ JE ZADOVOLJEN JER VRIJEDI 4.59<6.81 MN							

U prilogu 6 se nalazi grafički prikaz tlocrta temelja i predviđena opterećenja na tlo.

10. ZAKLJUČAK

Za potrebe polaganja trase nove ceste u NP Paklenica provedena su geotehnička i geofizička istraživanja, a radi utvrđivanja geološkog sastava i mehaničkih karakteristika. Trasa ceste dužine je 1+202,17 m. Istražni prostor u cijelosti pripada krškom prostoru s osebujnim geološkim, geomorfološkim i hidrološkim osobinama. Duž trase prevladavaju karbonatne stijene predstavljene vapnencima i vapnenim brečama. Istraživane dijelove parka izgrađuju karbonatne naslage kredne i paleogenske starosti. Početna dionica prolazi ravničarskim krajem, s površinski okršenom vapnenačkom stijenom, s mnogo slobodnih blokova međusobno ispunjenih glinom crvenicom. Čišćenje se vrši u kamenitim materijalima iskopne kategorije "A" i dio materijala iskopne kategorije "C". Na ovom prostoru posteljica se formira čišćenjem teškom mehanizacijom, izdvajanjem i usitnjavanjem vangabaritnih blokova, razastiranjem i planiranjem ostatnog materijala, završno s nasipavanjem i razastiranjem izravnavajućeg sloja od čistog sitnog kamenog materijala. Sve u skladu s OTU 2-10.3. Na posteljici je potrebno postići kriterij modula stišljivosti $M_s \geq 40 \text{ MN/m}^2$. Iduća dionica zasijeca se u stijenu gromadasto formirane vapnene breče. Strme padine podložne su intenzivnom trošenju, s nizom slobodnostojećih, nestabilnih blokova. Formirani zasjek može stabilno stajati pod kutom 50° do 70° , s potrebom za otkidanjem svih slobodnostojećih blokova pri čemu treba posebno paziti da ne dođe do potkopavanja ostatka zasjeka. Po izvedenom iskopu utvrdit će se eventualne potrebne mjere zaštite pokosa. Geotehnički istražni radovi i laboratorijska ispitivanja tla omogućili su nam mnoštvo podataka neophodnih za daljnju analizu nosivosti tla i projektiranja temelja mosta. Temelj upornjaka na obroncima na približnoj stacionaži 1+150,00 m, temeljit će se u mehaničkim deluvijalnim brečama izražene uslojenosti s padom slojeva $15 - 18^\circ$. Prema iskopu navedeni materijal klasificira kao OTU "B" kategorija, odnosno "V" Sukladno staroj klasifikaciji JUS U.E1.010. Sondiranjem tla u dolini, na koti Velike Paklenice do dubine 7,0 m, utvrđeni su prašnasti šljunci (GM) do u dubljem intervalu, zaglinjenog sastava (GC). Za utvrđeni geotehnički profil karakteristična je promjena gustoće pakiranja zrna, tako u manjim intervalima relativna zbijenost premašuje $Dr > 90\%$ (vapnom vezani sediment). Prosječna zbijenost kreće se od $Dr = 60 -$

70%. Također je karakteristično za ove sedimente da su slabo vodo propusni, odnosno voda samo mjestimice vertikalno penetrira u ove slojeve i to u obliku pojedinih kanala. Kada budu poznati položaji temelja stupišta mosta potrebno je ponovo provesti detaljizirani geostatički proračun, te prije početka betoniranja potrebno je da građevni iskop pregleda ovlašteni geomehaničar i potvrdi sukladnost materijala s nalazima iz ovog elaborata.

11. POPIS LITERATURE

Aydin, A. (2009) *ISRM Suggested Method for Determination of the Schmidt Hammer Rebound Hardness: Revised Version*, 627–634.

Colev, P. (2014). *Geotehnički elaborat za potrebe polaganja trase ceste u NP Paklenica*.

Kavur, B. (2015) *Geotehnički praktikum 1 (interna skripta)*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet.

Milsom, J. (2003) *Field Geophysics. third edition*. England: The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, John Wiley & Sons Ltd. (str. 167)

Strelec, S., Jug, J., Smrečki, D. (2012) *Podpovršinski istražni radovi (interna skripta)*. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet. (str. 99-102) (str. 58.)

Šumanovac, F. (2007). *Geofizička istraživanja podzemnih voda*. Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Pauk Cerna. (str. 81-82)

Popis slika

Slika 1. Položaj trase ceste na osnovnoj geološkoj karti (Colev, 2014).

Slika 2. Definicija otpornosti.

Slika 3. Prikaz granica otpornosti nekih materijala (Colev, 2014).

Slika 4. Wennerov raspored elektroda (Strelec i sur. 2012).

Slika 5. Schlumbergerov raspored elektroda (Strelec i sur. 2012)

Slika 6. Raspored elektroda kod geoelektrične 2D tomografije (Wenner) (Colev, 2014).

Slika 7. Wennerov raspored (Strelec i sur. 2012).

Slika 8. Georadarska oprema.

Slika 9. Cilindar za SPT standardnih dimenzija prema ASTM (American Society for Testing and Materials) (Strelec i sur. 2012).

Slika 10. Postupak ispitivanja standardnim penetracijskim pokusom (Strelec i sur. 2012).

Slika 11 Princip rada Schmidtovog čekića (Aydin, 2009).

Slika 12. Korelacijski dijagram tlačne čvrstoće prema odskoku Schmidtovog čekića (Colev, 2014).

Slika 13. Korelacijski dijagram Youngovog modula prema vrijednostima odskoka Schmidtovog čekića (Colev, 2014).

Slika 14. Određivanje geološkog indeksa čvrstoće (GSI) programom RocLab (Colev, 2014).

Slika 15. Analiza čvrstoće stjenjskog masiva korištenjem programa RocLab (Colev, 2014).

Slika 16. Slikovni prikaz modela tla (Colev, 2014).

Popis tablica

Tablica 1. Kategorije tla prema električnim otpornostima, dolina Velike Paklenice.

Tablica 2. Karakterizacija tla prema veličini zrna

Tablica 3. Termini za klasifikaciju graduacije tla

Tablica 4. USCS(Unified Soil Classification System) jedinstvena (objedinjena) klasifikacija tla

Tablica 5. Odskok Schmidtovog čekića za lokaciju trasa ceste NP Paklenica sa tlačnim čvrstoćama

Tablica 6. Model temeljnog tla 1

Tablica 7. Model temeljnog tla 3

Tablica 8. Parcijalni faktori sigurnosti prema Eurokodu 7 (EC7, HRN EN 1997-1:2008 en)

Tablica 9.Podatci o tlu i temeljnoj ploči

Popis i objašnjenje kratica korištenih u radu

ERT (Electrical resistivity tomography) - električna tomografija, geoelektrično profiliranje

GPR (Ground penetrating radar) - georadar

VES (Vertical electrical sounding) - vertikalno električno profiliranje, tj. geoelektrično sondiranje

SPT (Standard Penetration Test) - standardni penetracijski pokus

USCS (Unified Soil Classification System) - jedinstvena (objedinjena) klasifikacija tla

ASTM (American Society for Testing and Materials) - američka norma za ispitivanje materijala

ISRM (International society for rock mechanics) – internacionalno društvo za mehaniku stijena

RMR (Rock mass rating) – geomehanička klasifikacija stijena

GRAFIČKI PRILOZI

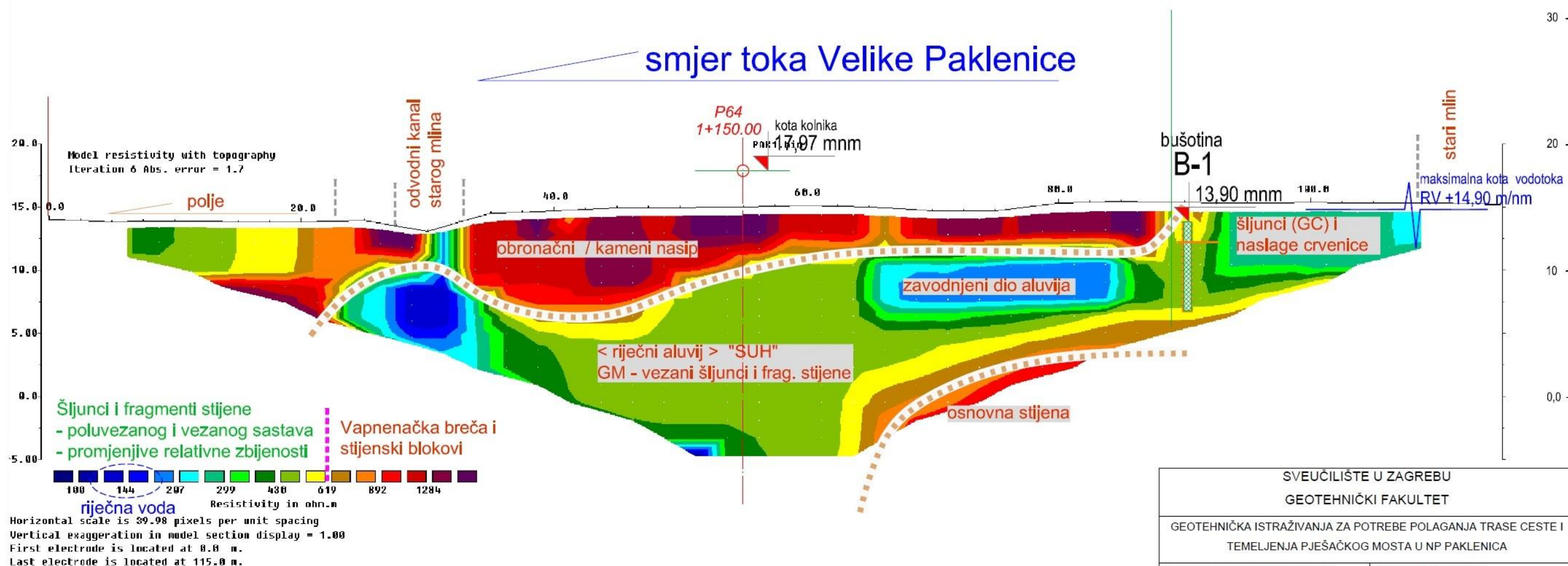
ERT-1 190° ERT-1
NP Paklenica

TUMAČ OZNAKA

ERT-1	190°	ERT-1	- oznaka geotehničkog profila
B-5			- oznaka sondažne bušotine
190°			- azimut profila

Horizontalno mjerilo M_h 1:250
Vertikalno mjerilo M_v 1:250

smjer toka Velike Paklenice

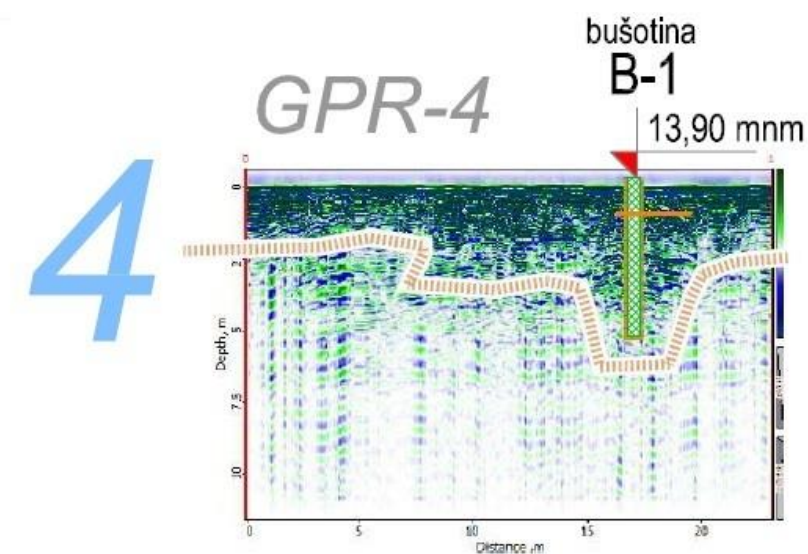
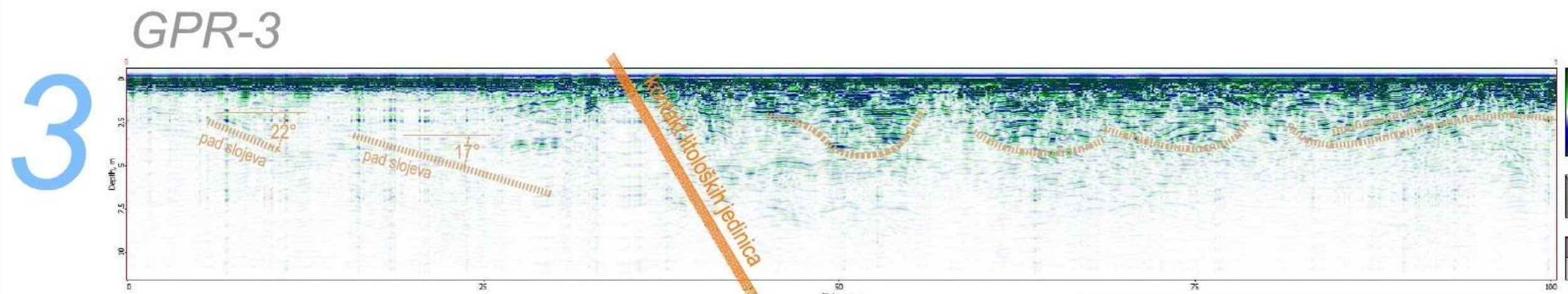
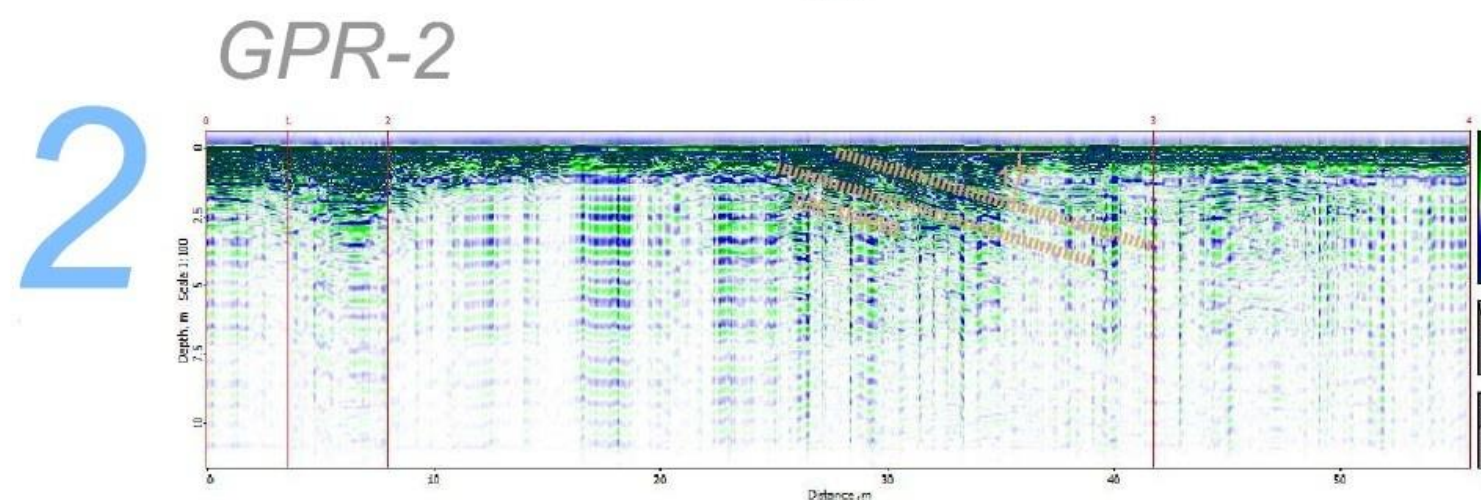
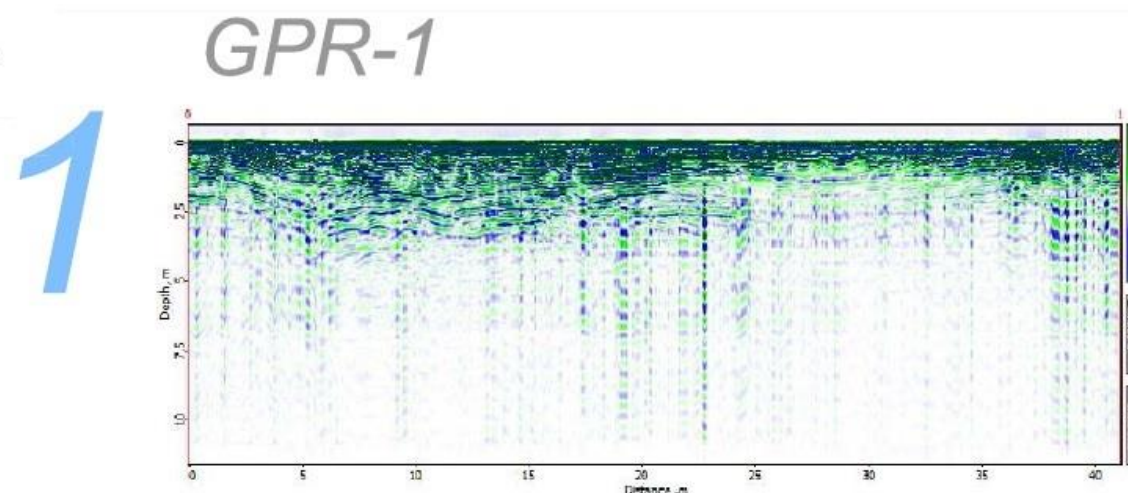


SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

Naziv priloga: Profil električne tomografije	Datum: 28.8.2017
Mjerilo: M 1:250	Broj priloga: Prilog 1
Kandidat: Viktor Ricijaš	Mentor: Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec

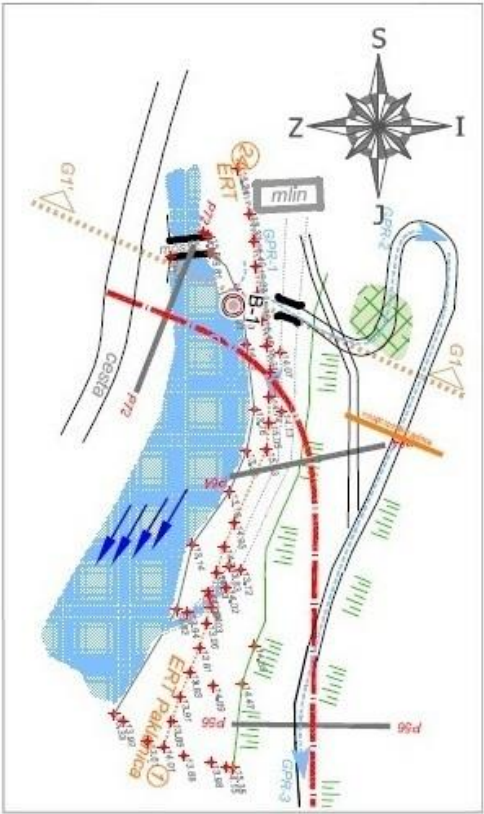
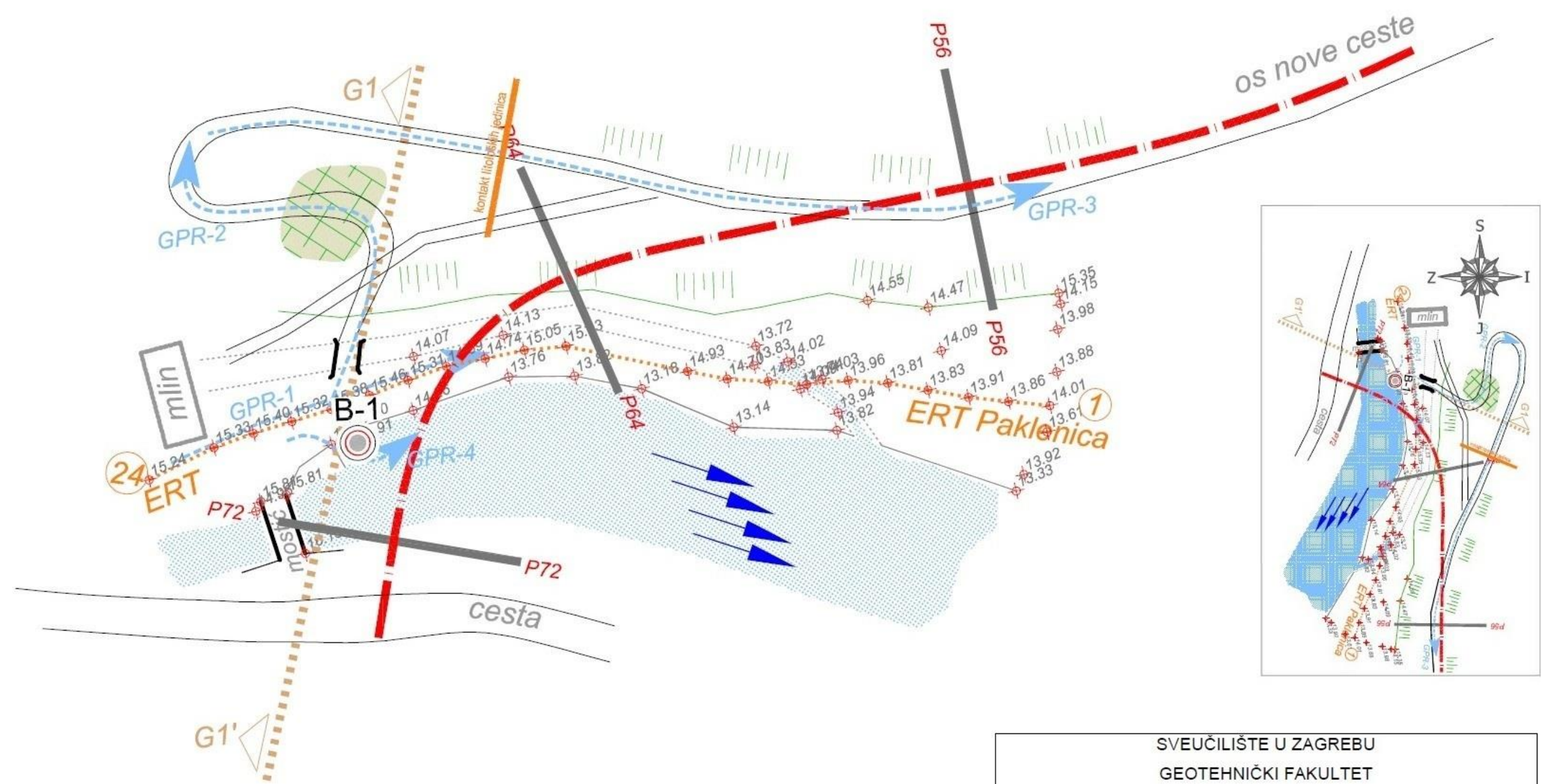


TUMAČ OZNAKA

P4 → 145° → P4'	- oznaka geotehničkog profila
B-5	- oznaka sondažne bušotine
145°	- azimut profila

Horizontalno mjerilo M_h 1:300
Vertikalno mjerilo M_v 1:300

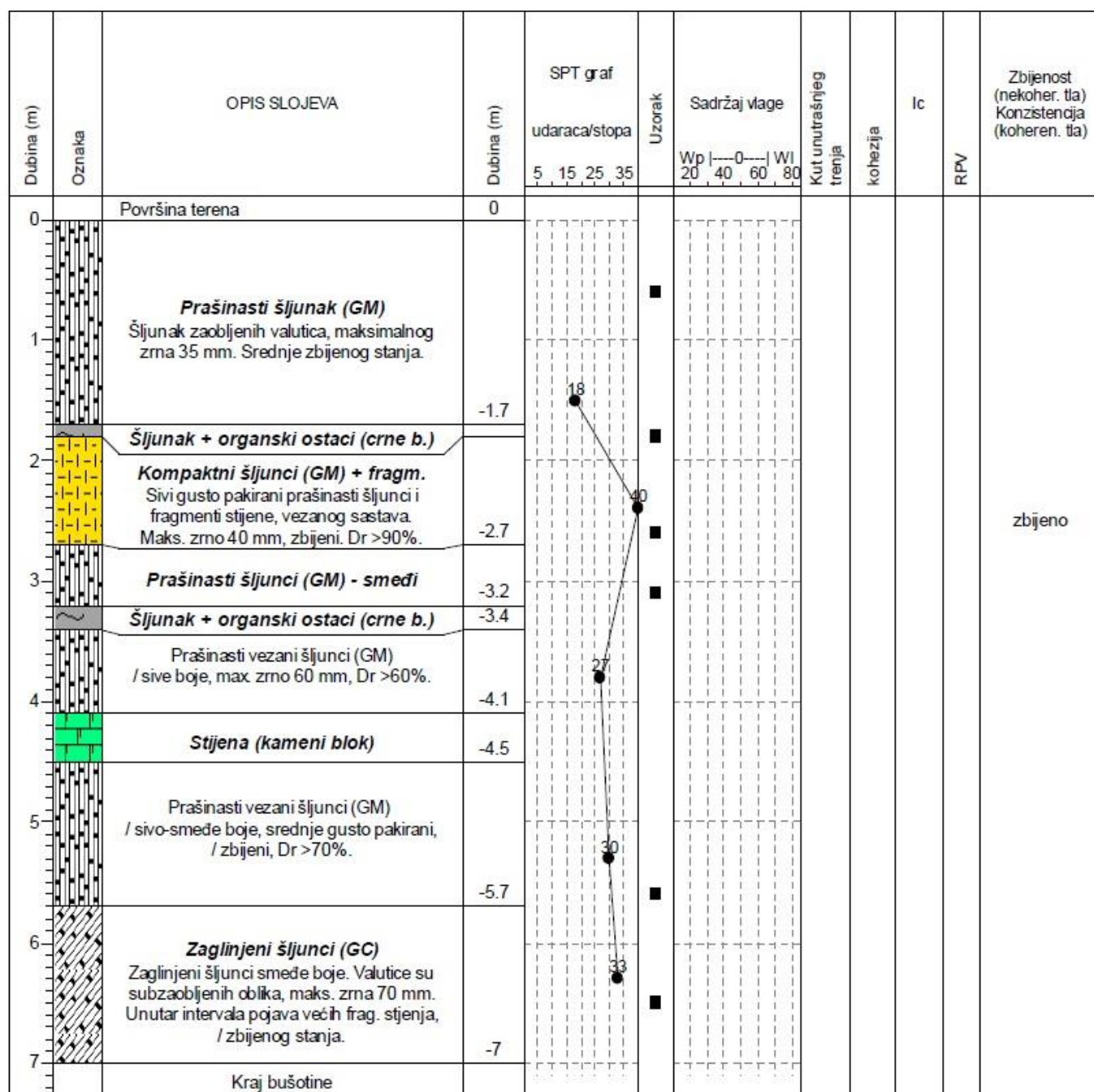
SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET	
GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA	
Naziv priloga: Georadarski profili	Datum: 28.8.2017
Mjerilo: M 1:300	Broj priloga: Prilog 2
Kandidat: Viktor Ricijaš	Mentor: Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec



TUMAČ OZNAKA

- ① ERT Paklenica - profil električne tomografije (ERT), s oznakom elektrode
- B-1 - geotehnička istražna bušotina
- GPR-2 - georadarski profil

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET	
GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA	
Naziv priloga: Situacijski plan s položajem ispitivanja	Datum: 28.8.2017
Mjerilo: M 1:500	Broj priloga: Prilog 3
Kandidat: Viktor Ricijaš	Mentor: Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

Naziv priloga: Sondažni profil B-1

Datum: 28.8.2017

Mjerilo: -

Broj priloga: Prilog 4

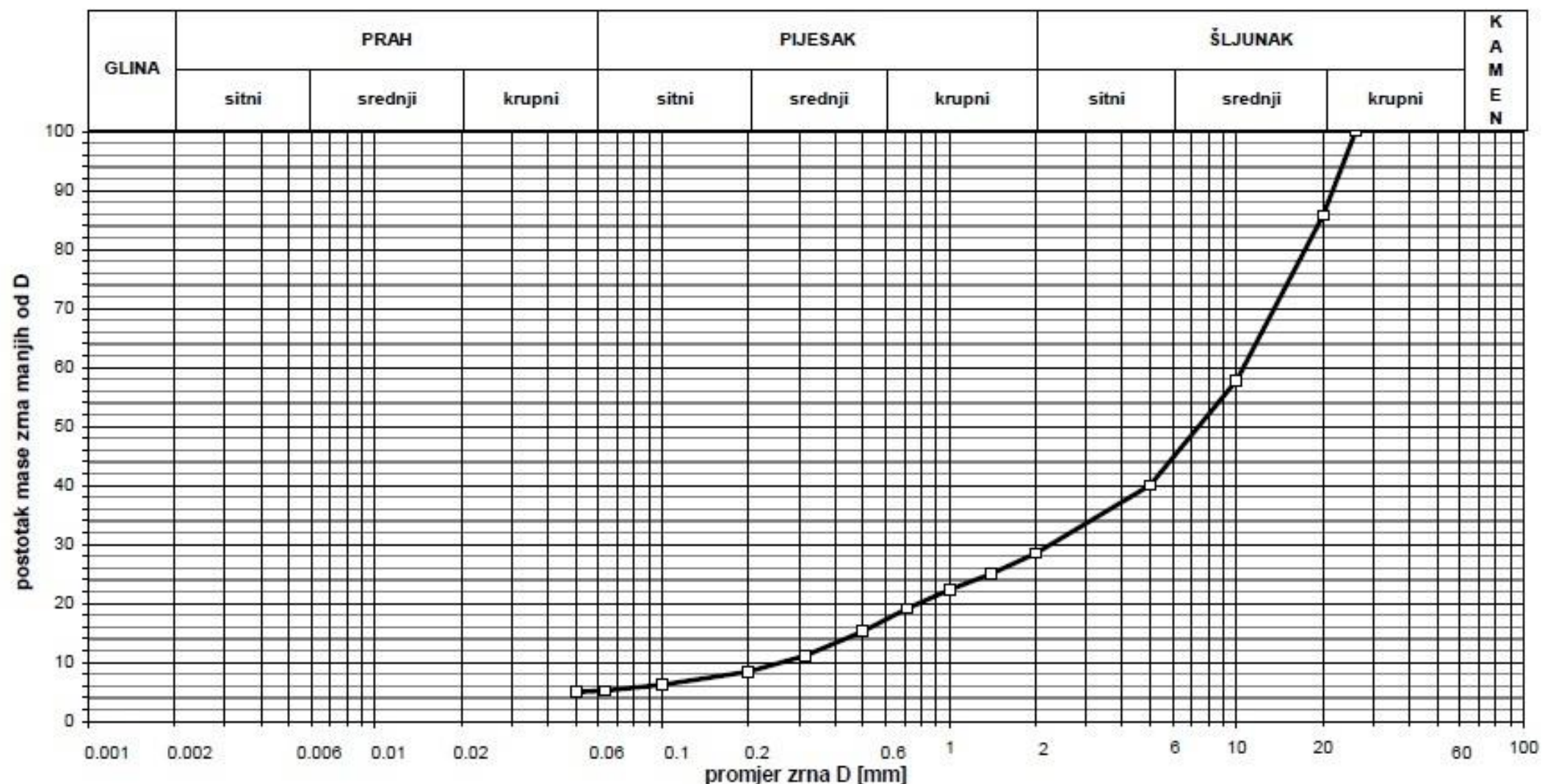
Kandidat:

Viktor Ricijaš

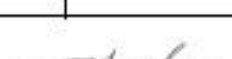
Mentor:

Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec

GRANULOMETRIJSKI DIJAGRAM

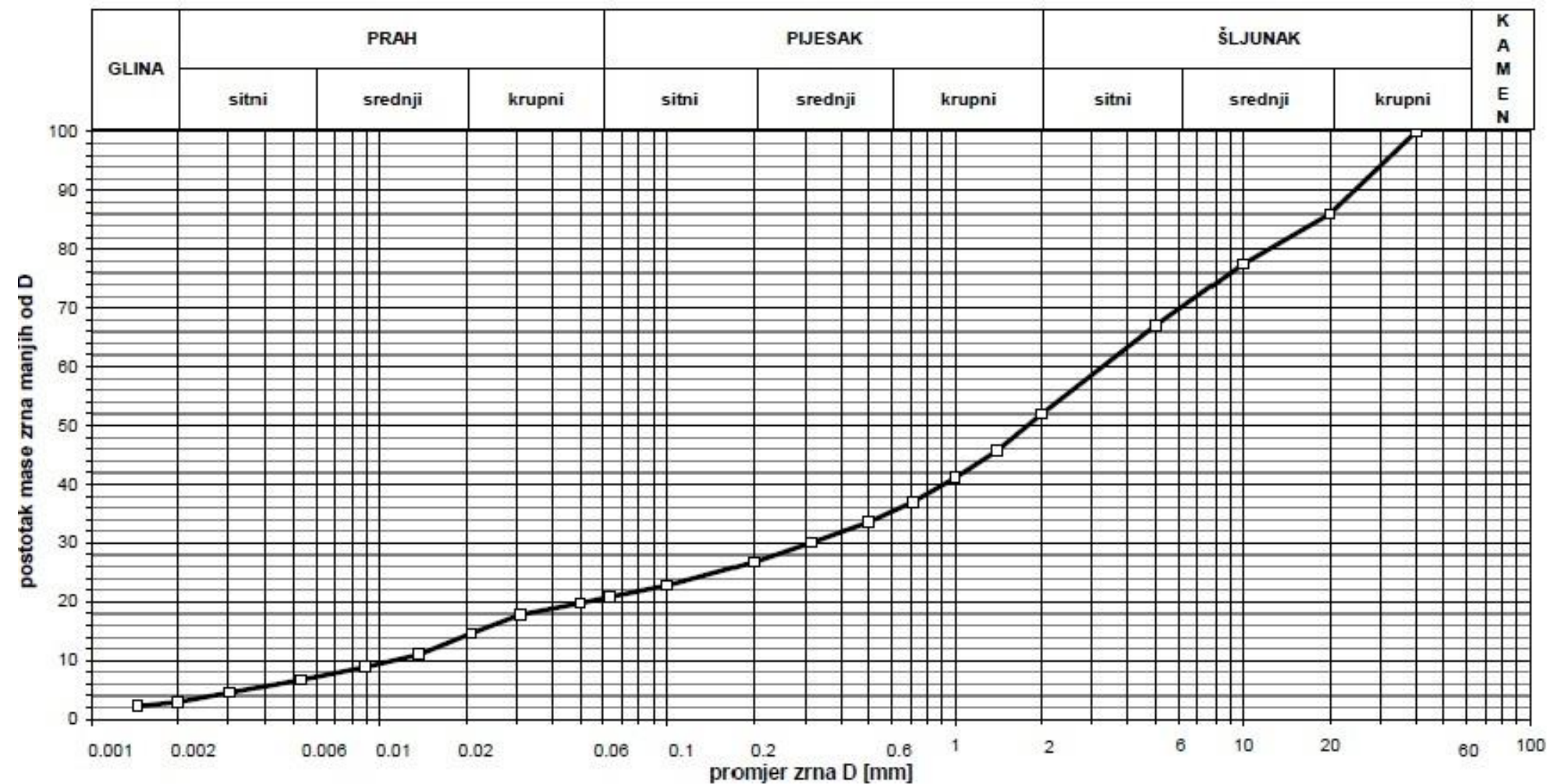


Promjer zrna "D"	Maseni % zrna manjih od "D"
mm	%
26,00	100,0
20,00	85,83
10,00	57,84
5,00	40,04
2,00	28,49
1,40	25,06
1,00	22,33
0,7100	19,08
0,5000	15,30
0,3150	11,17
0,2000	8,43
0,1000	6,21
0,0630	5,21
0,0500	4,98


Radni nalog:		Dubina (m):		Cu	Cc	ŠLJUNAK (%)	PIJESAK (%)	PRAH (%)	GLINA (%)	USCS
Oznaka uzorka:	B - 1	0,50 - 0,70	□	40,64	1,86	71,51	23,28	5,21	/	GW-GM
Građevina:	Cesta u NP Paklenica			USCS klasifikacija		Pregledao:				
Lokacija:	Starigrad			GW-GM		Varaždin, ožujak 2014.				

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU GEOTEHNIČKI FAKULTET	
GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA	
Naziv priloga: Granulometrijski dijagram na dubini 0,5-0,7m	Datum: 28.8.2017
Mjerilo: -	Broj priloga: Prilog 5, list 1
Kandidat: Viktor Ricijaš	Mentor: Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec

GRANULOMETRIJSKI DIJAGRAM



Promjer zrna "D"	Maseni % zrna manjih od "D"
mm	%
40,00	100,0
20,00	86,02
10,00	77,49
5,00	67,03
2,00	51,97
1,40	45,74
1,00	41,07
0,7100	37,00
0,5000	33,56
0,3150	30,05
0,2000	26,77
0,1000	22,79
0,0630	20,85
0,0500	19,74
0,0309	17,80
0,0208	14,65
0,01367	11,03
0,00891	8,92
0,00532	6,74
0,00304	4,56
0,00200	2,93
0,00145	2,24

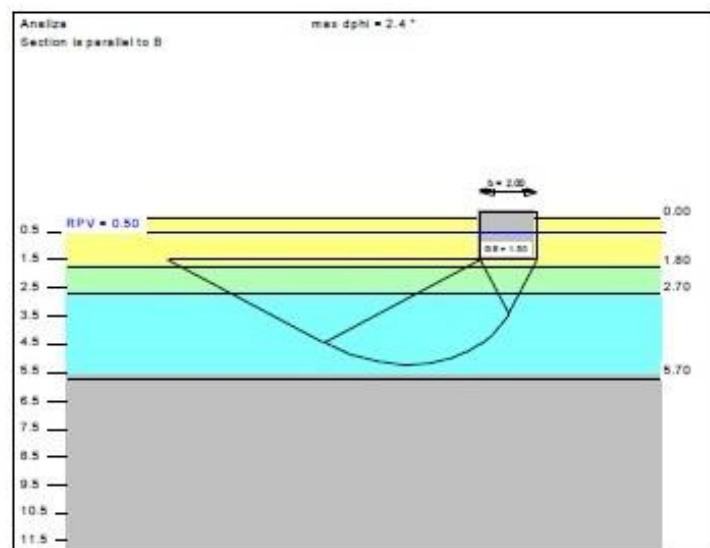
Radni nalog:		Dubina (m):	Cu	Cc	ŠLJUNAK (%)	PIJESAK (%)	PRAH (%)	GLINA (%)	USCS
Oznaka uzorka:	B - 1	2,50 - 2,70	□		48,03	31,12	17,92	2,93	GM
Građevina:	Cesta u NP Paklenica Starigrad		USCS klasifikacija		Pregledao:				
GM			Varaždin, ožujak 2014.						

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

Naziv priloga: Granulometrijski dijagram na dubini 2,5-2,7m	Datum: 28.8.2017
Mjerilo: -	Broj priloga: Prilog 5, list 2
Kandidat: Viktor Ricijaš	Mentor: Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec

TLO	γ [kN/m ³]	γ' [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kN/m ²]	E _s [MN/m ²]	v [-]	OPIS
	19.0	9.0	35.0	0.0	18.0	0.00	Šljunak (GM)
	19.0	9.0	36.0	0.0	40.0	0.00	Vezani šljunaci (GM) sa frag.
	19.0	9.0	34.0	0.0	25.0	0.00	Prašinasti šljunak (GM)
	19.0	9.0	33.0	5.0	30.0	0.00	Zaglinjeni šljunak (GC)



Ergebnisse Einzelfundament:
 Loads = Permanent / Changeable
 Vertical load $F_{v,k} = 2500.00 / 400.00$ kN
 Horizontal force $F_{h,k,x} = 0.00 / 0.00$ kN
 Horizontal force $F_{h,k,y} = 0.00 / 30.00$ kN
 Moment $M_{k,x} = 0.00 / 75.00$ kN * m
 Moment $M_{k,y} = 0.00 / 0.00$ kN * m
 Length L = 5.00 m
 Width B = 2.00 m

Below permanent loads:

Eccentricity $e_x = 0.000$ m
 Eccentricity $e_y = -0.000$ m
 Resultant is in 1st core dimen.
 Length L' = 5.00 m
 Width B' = 2.00 m

Below total loads:

Eccentricity $e_x = 0.000$ m
 Eccentricity $e_y = -0.026$ m
 Resultant is in 1st core dimen.
 Length L' = 4.95 m
 Width B' = 2.00 m

Bearing capacity:

Partial FOS (bearing capacity) $\gamma_{Gr} = 1.00$
 $\sigma_{ot,k} / \sigma_{ot,d} = 1032.8 / 1032.8$ kN/m²
 $R_k = 10221.3$ kN

$R_d = 10221.3$ kN
 $V_d = 1.35 * 2500.00 + 1.50 * 400.0$ kN
 $V_d = 3975.0$ kN
 f (parallel to B) = 0.389
 f (parallel to L) = 0.273
 $\text{cal } \phi = 34.4^\circ$
 $\text{cal } c = 0.00$ kN/m²
 $\text{cal } \gamma_2 = 9.00$ kN/m³
 $\text{cal } \sigma_u = 18.50$ kN/m²
 Bearing capacity coeff. (x):
 $N_c = 43.9$; $N_d = 31.1$; $N_b = 20.6$
 Shape coeff. (x):
 $v_c = 1.236$; $v_d = 1.229$; $v_b = 0.879$
 Gradient coeff. (x):
 $\kappa_c = 1.000$; $\kappa_d = 1.000$; $\kappa_b = 1.000$
 $f [V(st), M \text{ und } H(\text{gesamt})] = 0.331$

Settlement from total loads:

Limiting depth $t_b = 9.16$ m b. GL
 Rasterećenje = 20.0 kN/m²

Settlement (mean of CP's) = 2.01 cm

Settlement of CPs:

top left = 1.98 cm
 top right = 1.98 cm
 bottom left = 2.04 cm
 bottom right = 2.04 cm

ULAZNI PODACI:

Paklenica

Parcijalni faktori sigurnosti

$\gamma (Gr) = 1.00$

$\gamma (G) = 1.35$ (EC7, PP3)

$\gamma (Q) = 1.50$

Dubina temeljenja = 1.50 m

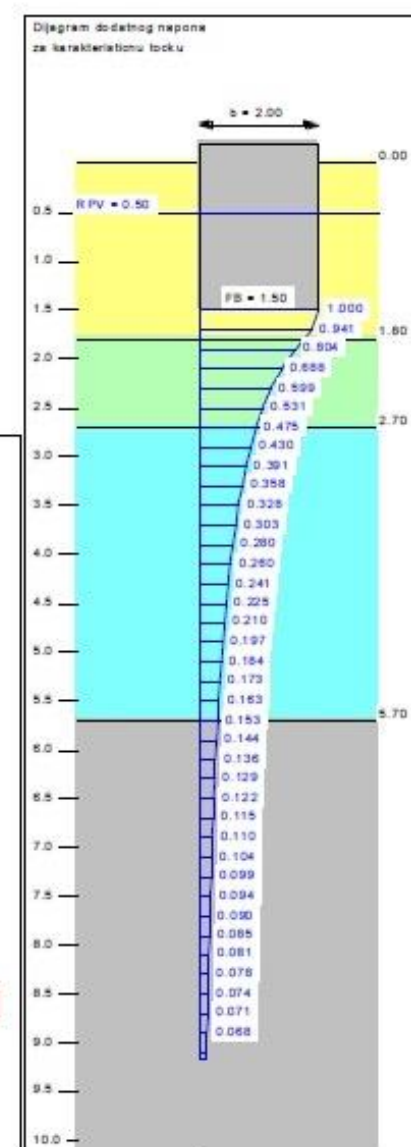
Razina podzemne vode (RPV) > 0.50 m

Utjecajna dubina racunata do $p = 20.0$ %

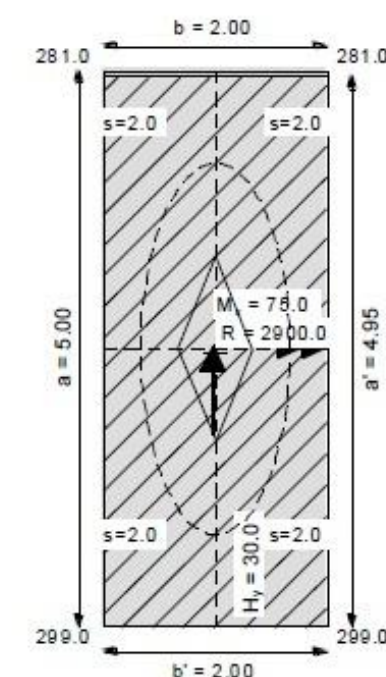
SAMCI "STOPA"

B x L = 2.00 x 5.00 m, h = 1.50 m

Df = 1.0 m



TLOCRT



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA ZA POTREBE POLAGANJA TRASE CESTE I
 TEMELJENJA PJEŠAČKOG MOSTA U NP PAKLENICA

Naziv priloga: Tlocrt temelja i
 raspodjela naprezanja

Datum: 28.8.2017

Mjerilo:

-

Broj priloga: Prilog 6

Kandidat:

Viktor Ricijaš

Mentor:

Izv. prof. dr. sc Stjepan Strelec